



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ -
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ Α. ΜΕΝΟΥ

ΤΑ ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΙ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2020





ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ Α. ΜΕΝΟΥ

ΤΑ ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΙ ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Αναπληρωτής Καθηγητής

© Ελευθερία Α. Μένου, 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



© Ελευθερία Α. Μένου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Τα επιθερμικά και πορφυριτικά κοιτάσματα της Ελλάδας– *Διπλωματική Εργασία*

© Eleftheria A. Menou, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2020

All rights reserved.

The epithermal and porphyry deposits of Greece– *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Η εικόνα σχετίζεται με την επιθερμική μεταλλοφορία Ολιγοκαίνου στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα απεικονίζει φλέβες χαλαζία βαρύτη BBA κλίσης με γαληνίτη-τενναντίτη να διασχίζουν ψαμμίτες προχωρημένης αργιλικής και σερικιτικής εξαλλοίωσης στο βόρειο τμήμα του μεταλλείου του Αγίου Φιλίππου (Πηγή: Voudouris, P., Mavrogonatos, C., Spry, P. G., Baker, T., Melfos, V., Klemd, R. & Tarantola, A. (2019)).



Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	7
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	8
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ-ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	15
3. ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ	19
3.1 Μάζα Ροδόπης και Περιροδοπική Ζώνη Ολιγοκαίνου	21
3.2 Μάζα Ροδόπης και Περιροδοπική Ζώνη Μειοκαίνου	28
3.3 Αττικοκυκλαδική Ζώνη Πλειόκαινου-Πλειστόκαινου	29
4. ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ	30
4.1 Μάζα Ροδόπης και Περιροδοπική Ζώνη Ολιγοκαίνου	30
4.2 Μάζα Ροδόπης Μειοκαίνου	36
4.3 Σερβομακεδονική Ζώνη Μειοκαίνου.....	37
4.4 Αττικοκυκλαδική Ζώνη Μειοκαίνου	39
5. ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ	39
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	41



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα επιθερμικά και πορφυριτικά κοιτάσματα της Ελλάδας

Ελευθερία Μένου

Η παρούσα διπλωματική πτυχιακή εργασία αφορά τα επιθερμικά και πορφυριτικά κοιτάσματα της Ελλάδας. Συγκεκριμένα, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα επιθερμικά κοιτάσματα της Μάζας της Ροδόπης, της Περιοδοπικής και της Αττικοκυκλαδικής Ζώνης καθώς και στα πορφυριτικά κοιτάσματα στις ίδιες ακριβώς ζώνες με επιπλέον την Σερβομακεδονική. Τα κοιτάσματα διακρίνονται με βάση την ηλικία σε κοιτάσματα Ολιγοκαίνου, Μειοκαίνου και Πλειόκαινου-Πλειστόκαινου και θεωρούνται σημαντικά για την μεγάλη προσφορά τους σε βασικά και πολύτιμα μέταλλα. Τα κοιτάσματα αυτά εμφανίζονται σε περιβάλλον μετα-υποβύθισης. Η οπισθοτόξια έκταση που παρουσιάστηκε είχε ως αποτέλεσμα την εκταφή μεταμορφικών συμπλεγμάτων πυρήνα και τον σχηματισμό ασβεσταλκαλικού-αλκαλικού μαγματισμού κατά μήκος των ρηγμάτων αποκόλλησης. Χαρακτηριστικό αυτών των κοιτασμάτων είναι οι υδροθερμικές εξαλλοιώσεις οι οποίες μαζί με ορισμένα άλλα ορυκτά αποτελούν βασικά στοιχεία στην αναζήτηση τέτοιου είδους κοιτασμάτων στην Ελλάδα.



ABSTRACT

The epithermal and porphyry deposits of Greece

Eleftheria Menou

This diploma thesis focuses on the epithermal and porphyry deposits of Greece. Special emphasis is given to the epithermal deposits of the Rhodope Massif, the Circum-Rhodope Belt and the Attic-Cycladic Zone as well as the porphyry deposits in the same geotectonic zones and additionally in the Serbo-Macedonian Massif. The deposits are distinguished on the basis of their age in Oligocene, Miocene and Pleiocene-Pleistocene deposits and are considered to be potential for the future supply of basic and precious metals. These deposits were formed in a post-subduction environment. The back-arc extension that occurred in this environment resulted in the exhumation of metamorphic core complexes and the formation of calc-alkaline-alkaline magmatism along detachment faults. One characteristic of these deposits is the hydrothermal alterations which with some other minerals are key elements in the exploration for this type of deposits in Greece.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής διπλωματικής εργασίας μου ανατέθηκε τον Σεπτέμβριο του 2020 από τον Καθηγητή του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, κ. Βασίλειο Μέλφο, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την υπόδειξη του θέματος, την καθοδήγηση και τις συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της εργασίας. Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία επιχειρεί να παρουσιάσει τα επιθερμικά και πορφυριτικά κοιτάσματα στην βόρεια Ελλάδα καθώς και στην περιοχή του Αιγαίου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Β. Μέλφο, που ήταν ο επιβλέπων της πτυχιακής αυτής εργασίας, για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, όπως και για την συνεχή βοήθειά του κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ελλάδα περιλαμβάνει μια ποικιλία μαγματικών-υδροθερμικών κοιτασμάτων πορφυριτικού και επιθερμικού τύπου και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική προσφορά του χρυσού. Συγκεκριμένα, η περιοχή του Αιγαίου περιλαμβάνει πορφυριτικού και επιθερμικού τύπου κοιτάσματα πολύτιμων και βασικών μετάλλων και γι' αυτό αποτελεί μία από τις πιο υποσχόμενες περιοχές για μελλοντική εκμετάλλευση χρυσού καθώς και βασικών και σπανίων μετάλλων στην Ευρώπη. Αυτοί οι τύποι κοιτασμάτων συγκεντρώνονται κυρίως σε δύο περιοχές, στους ορεινούς όγκους της Ροδόπης και της Αττικοκυκλαδικής, και σχηματίστηκαν από το Ολιγόκαινο έως το Πλειστόκαινο. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν σε τέσσερις κύριες περιόδους: Ολιγόκαινο (33–25 Ma), κάτω Μειόκαινο (22–19 Ma), μέσο έως άνω Μειόκαινο (14–7 Ma), και Πλειόκαινο-Πλειστόκαινο (3–1,5 Ma). Επομένως, μέσα στη δυτική μεταλλογενετική επαρχία της Τηθύος, η Ολιγοκαινική, η Μειοκαινική και η Πλειοκαινική-Πλειστοκαινική μαγματική-μεταλλογενετική ζώνη στην περιοχή του Αιγαίου, στην Ελλάδα, είναι μία από τις πλουσιότερες ζώνες μετάλλων.

Τα πορφυριτικά κοιτάσματα τα οποία εμφανίζονται εντός μαγματικών ζωνών αντιπροσωπεύουν αναμφισβήτητα την πιο οικονομικά σημαντική κατηγορία μη σιδηρούχων μεταλλικών ορυκτών πόρων. Αυτά τα μαγματικά-υδροθερμικά κοιτάσματα χαρακτηρίζονται από σουλφίδια και οξειδία σε φλεβίδια και από διάσπαρτη μεταλλοφορία σε μεγάλους όγκους υδροθερμικού αλλοιωμένου πετρώματος και ομαδοποιούνται σε πέντε κατηγορίες με βάση το οικονομικά κυρίαρχο μέταλλο: Au, Cu, Mo, W και Sn. Επίσης, περιλαμβάνουν διάφορες παραλλαγές όπως Cu-Au-, Cu-Mo-Au-Re, Mo-Re και Mo-W.

Τα επιθερμικά κοιτάσματα περιλαμβάνουν κυρίως υψηλής και ενδιάμεσης θείωσης (HS και IS) τύπους (υπάρχουν και LS χαμηλής θείωσης) που φιλοξενούνται σε ηφαιστειακά πετρώματα. Παρόλα αυτά, υπάρχει διάσπαρτη μεταλλοφορία, μεταλλοφόρες φλέβες και breccias που φιλοξενούνται σε ιζηματογενή και μεταμορφωμένα πετρώματα. Οι κύριες μεταλλικές ενώσεις είναι η Cu-Au-Ag-Te σε HS επιθερμικά κοιτάσματα και η Pb-Zn-Au-Ag-Te σε IS επιθερμικά κοιτάσματα. Επιθερμικά κοιτάσματα υψηλής θείωσης ενδέχεται να εμφανιστούν σε λιθοκαλύμματα πάνω από κοιτάσματα πορφυριτικού Cu, όπου συμπαγείς φλέβες σουλφιδίων τείνουν να αναπτύσσονται σε βαθύτερες δομές τροφοδοσίας και πλούσια

σε Au και Ag κοιτάσματα διάσπαρτης μεταλλοφορίας εντός των ανώτατων 500 μέτρων περίπου.

Ένα μεγάλο μέρος των πολύτιμων, σπάνιων και κρίσιμων μετάλλων προέρχεται από τα κοιτάσματα πορφυριτικού Cu-Au, Cu-Mo-Au-Re και Mo, και τα επιθερμικά κοιτάσματα Cu-Au-Te υψηλής θείωσης, Pb-Zn-Ag-Au ενδιάμεσης θείωσης και Au-Ag χαμηλής θείωσης.

Η οπισθοτόξια έκταση στο Αιγαίο Πέλαγος, ο σχηματισμός συμπλέγματος μεταμορφικών πυρήνων, η ταυτόχρονη μεταγενέστερη υποβύθιση και ο μαγματισμός τόξου είχαν ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό αυτών των κοιτασμάτων. Όλα αυτά σχετίζονται με τα εντός του τόξου και τα οπισθοτόξια μαγματικά πετρώματα και με την τοποθέτηση μάγματος, καθώς ελέγχονται από ρήγματα αποκόλλησης, και από τον σχηματισμό supra-dettachment τεκτονικών λεκανών σε ένα περιβάλλον έκτασης. Η τοποθέτηση γρανιτοειδών κατά μήκος των ρηγμάτων αποκόλλησης σε ρηχά έως μεσαία επίπεδα φλοιού, είχε ως αποτέλεσμα διάφορες μορφές μαγματικών-υδροθερμικών κοιτασμάτων. Ο σχηματισμός των πορφυριτικών κοιτασμάτων αρχίζει με την δημιουργία ενός ενδιάμεσου έως όξινου μαγματικού θαλάμου, η σύσταση του οποίου μπορεί να ποικίλει ευρέως. Αυτή η διαδικασία ξεκινά με τη δημιουργία βασικών μαγμάτων που προέρχονται από το μανδύα από τα ρευστά που προέρχονται από την υποβύθιση ή την ασθενοσφαιρική άνοδο.

Τα πορφυριτικά και επιθερμικά κοιτάσματα υψηλής, ενδιάμεσης και χαμηλής θείωσης (HS, IS και LS, αντίστοιχα) σχετίζονται με τη δημιουργία ένυδρων ασβεσταλκαλικών και αλκαλικών μαγμάτων τόσο σε περιβάλλον υποβύθισης όσο και σε περιβάλλον μετά την υποβύθιση (Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2010; Richards, 2009, 2011; Kouzmanov και Pokrovski, 2012). Επιπλέον, σχετίζονται με διεισδύσεις, τόσο με «οξειδωμένα» όσο και με περισσότερο «αλκαλικά» υποηφαιστειακά και πλουτωνικά πετρώματα παρέχοντας βασικά, πολύτιμα και κρίσιμα μέταλλα, όπως Cu, Mo, Au, Ag, Te, Bi, In, Sn, PGE και Re (Economou-Eliopoulos and Eliopoulos, 2005; Voudouris et al., 2013a,b, Voudouris et al., 2016a,b,c; Melfos and Voudouris, 2017; McFall et al. 2018). Τέτοιος εμπλουτισμός είναι συνηθισμένος για κοιτάσματα που σχηματίστηκαν σε περιβάλλον μετά την υποβύθιση εντός της ζώνης της Νεοτηθύος (π.χ. Richards, 2009, 2011).

Πολλοί παράγοντες έπαιξαν ρόλο στην προσφορά μετάλλων των πορφυριτικών-επιθερμικών συστημάτων του Αιγαίου όπως είναι η γονιμότητα του μάγματος στις περιοχές προέλευσης, το βάθος της τοποθέτησης των διεισδύσεων, η σχετική συνεισφορά του μανδύα έναντι του υλικού του φλοιού, η οξειδοαναγωγική (redox) κατάσταση του μάγματος που σχετίζεται με την υποβύθιση και οι φυσικοχημικές συνθήκες των ρευστών στον τόπο εναπόθεσης της μεταλλοφορίας.

Η υδροθερμική εξαλλοίωση είναι ένας οδηγός για την αναζήτηση τόσο εντός των ζωνών μεταλλοφορίας όσο και εκτός καθώς επεκτείνεται σε μεγαλύτερο όγκο ($>10 \text{ km}^3$) των γειτονικών πετρωμάτων.

Οι μορφές εξαλλοίωσης είναι ομάδες ορυκτών που σχηματίζονται σε παρόμοια γεωχημικά περιβάλλοντα (Meyer and Hemley, 1967), ταξινομούνται σε ζώνες και μπορούν να χωριστούν σε αυτές που φιλοξενούνται από αργιλοπυριτικά πετρώματα (τα περισσότερα πυριγενή, μετα-πυριγενή, μετα-ηφαιστειακά και κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα) και εκείνες που σχηματίζονται σε ανθρακικά και υπερβασικά πετρώματα (Barton et al., 1991a).

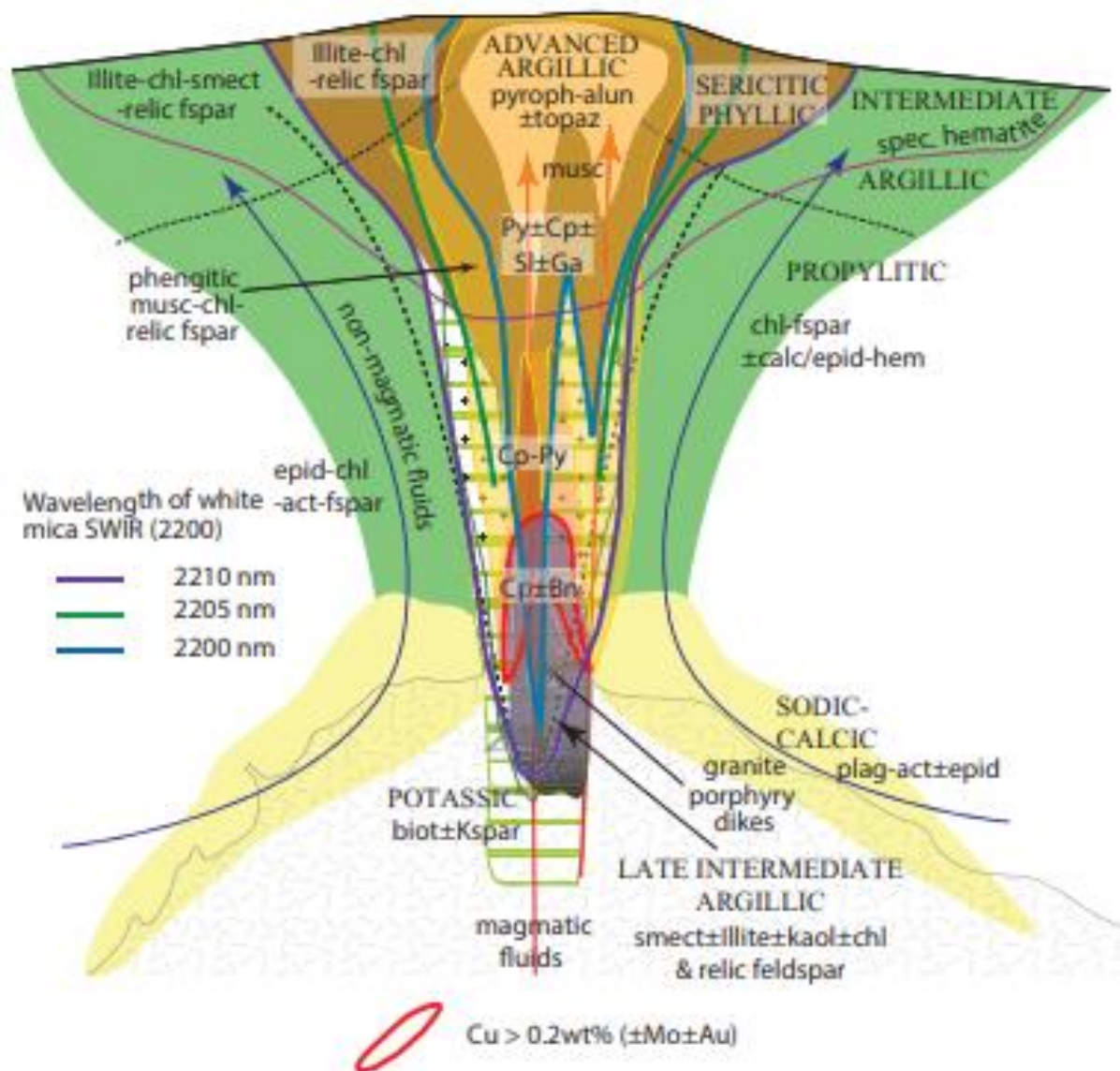
Η κατανομή των ζωνών εξαλλοίωσης-μεταλλοφορίας (Σχ. 1α και 1β) περιλαμβάνει, κεντρικά από κάτω προς τα πάνω την νατριοασβεστούχα, την ποτασσική, την σερικιτική και την προχωρημένη αργιλική εξαλλοίωση (Meyer and Hemley, 1967). Οι βαθιές, απομακρυσμένες πλευρές και οι περιφερειακές άνω περιοχές είναι ζώνες προπυλιτικής και, τοπικά, νατριοασβεστούχας εξαλλοίωσης. Η φυλλιτική και η σερικιτική εξαλλοίωση είναι συνώνυμα (Lowell and Guilbert, 1970).

Συγκεκριμένα, το βαθύ τμήμα των πορφυριτικών συστημάτων γενικά κυριαρχείται από ποτασσική εξαλλοίωση και το άνω μέρος των συστημάτων κυριαρχείται από υδρολυτική εξαλλοίωση, δηλαδή από τους τύπους σερικιτικής και προχωρημένης αργιλικής εξαλλοίωσης. Τρεις από τις πιο χαρακτηριστικές αλλοιώσεις που διακρίνονται στα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι η υδρολυτική εξαλλοίωση σε μεγάλο βαθμό πάνω από την ποτασσική εξαλλοίωση, η έντονη υδρολυτική εξαλλοίωση που περικλείεται εντός και επεκτείνεται πάνω από την ποτασσική εξαλλοίωση, και τόσο η νατριοασβεστούχα όσο και η ποτασσική που βρίσκονται στο κέντρο του συστήματος.

Τέσσερις διεργασίες ή τύποι χημικών αντιδράσεων που είναι υπεύθυνες για τους κύριους τύπους εξαλλοίωσης σε πορφυριτικά περιβάλλοντα είναι η προσθήκη πτητικών (προπυλιτική εξαλλοίωση), η υδρόλυση (σερικιτική, προχωρημένη αργιλική και ενδιάμεση αργιλική εξαλλοίωση), η ανταλλαγή αλκαλίων (π.χ., ποτασσική και νατριοασβεστούχα εξαλλοίωση) και η προσθήκη πυριτίου (πυριτική εξαλλοίωση).

Η ακολουθία γεγονότων εξαλλοίωσης-μεταλλοφορίας είναι κυρίως συνέπεια της προοδευτικής ψύξης πετρωμάτων και ρευστών, από $>700^\circ$ έως $<250^\circ \text{ C}$. Μόλις αδρανοποιηθεί το πλουτωνικό μάγμα, τα δύο ρευστά που συνυπάρχουν σε συνθήκες βρασμού δηλαδή το υπεραλατούχο ρευστό υψηλής θερμοκρασίας και ο ατμός που είναι υπεύθυνα για την ποτασσική εξαλλοίωση και την πρώιμη υπερκείμενη προχωρημένη αργιλική εξαλλοίωση, αντιστοίχως, οδηγούν στους $<350^\circ \text{ C}$ και με την ανάμειξη με μετεωρικά νερά, σε ένα μονοφασικό ρευστό χαμηλής έως μέτριας αλατότητας που προκαλεί

την σερικιτική εξαλλοίωση και τη σχετική μεταλλοφορία. Το ίδιο ρευστό προκαλεί επίσης μεταλλοφορία των περιφερειακών τμημάτων των συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των υπερκείμενων καλυμμάτων. Οι τύποι εξαλλοίωσης-μεταλλοφορίας γίνονται προοδευτικά νεότεροι προς τα πάνω.

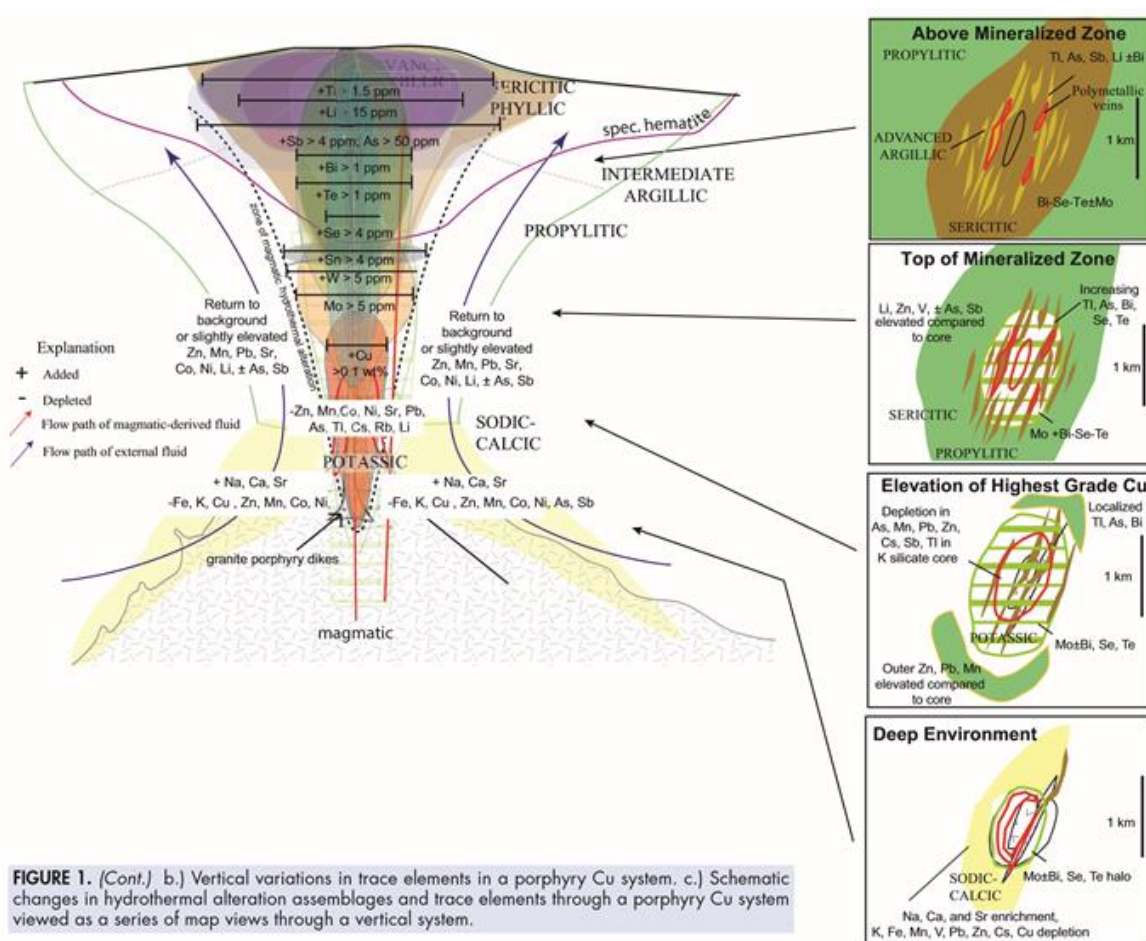


Σχ. 1a. Κάθετη κατανομή συγκροτημάτων υδροθερμικής εξαλλοίωσης σε ένα πορφυριτικό σύστημα (Πηγή: Halley, S. W., Dilles, J. H., & Tosdal, R. M., 2015).

Η τυπικά παρατηρούμενη χρονική εξέλιξη στα πορφυριτικά κοιτάσματα είναι από πρώιμες υψηλής θερμοκρασίας παραγενέσεις βιοτίτη± Κ-άστριο (ποτασσική εξαλλοίωση) έως παραγενέσεις μοσχοβίτη ± χλωρίτη (σερικιτική εξαλλοίωση) σε παραγενέσεις χαμηλής θερμοκρασίας που φέρουν αργίλιο (προχωρημένη αργιλική και ενδιάμεση αργιλική

εξαλλοίωση), η οποία είναι σύμφωνη με προοδευτικά μεγαλύτερη οξύτητα και υψηλότερες αναλογίες ρευστού προς πετρώματος, πριν από την τελική εξουδετέρωσή τους.

Ο βιοτίτης είναι το κυρίαρχο ορυκτό εξαλλοίωσης σε σχετικά βασικές πορφυριτικές διεισδύσεις και πετρώματα ξενιστές, ενώ ο Κ-άστριος αυξάνεται σε αφθονία σε περισσότερα όξινα, γρανοδιοριτικά προς χαλαζιακά μονζονιτικά περιβάλλοντα. Το νατριούχο πλαγιόλαστο μπορεί να είναι ένα συνοδευτικό ορυκτό εξαλλοίωσης και στα δύο περιβάλλοντα.



Σχ. 1β. Κάθετη κατανομή στοιχείων σε ένα πορφυριτικό σύστημα (αριστερά) και μεταβολές στις παραγενέσεις υδροθερμικής εξαλλοίωσης (δεξιά) (Πηγή: Halley, S. W., Dilles, J. H., & Tosdal, R. M., 2015).

Η ποτασσική εξαλλοίωση επικαλύπτεται από τη σερικιτική εξαλλοίωση, η οποία στενεύει προς τα πάνω για να σχηματίσει κουκούλα και μπορεί να επικαλυφθεί από σχετικά νέο πέτρωμα. Η ποτασσική εξαλλοίωση γίνεται γενικά λιγότερο έντονη από τις παλαιότερες έως τις νεότερες πορφυριτικές φάσεις. Χαμηλής θείωσης παραγενέσεις χαλκοπυρίτη ± βορνίτη είναι χαρακτηριστικά των ποτασσικών ζωνών, ενώ τα υψηλής θείωσης σουλφίδια δημιουργούνται προοδευτικά προς τα πάνω σε συνδυασμό με τη μείωση της θερμοκρασίας

και τους συνακόλουθους μεγαλύτερους βαθμούς υδρολυτικής εξαλλοίωσης, που καταλήγουν σε σιδηροπυρίτη $\pm$ εναργίτη $\pm$ κοβελίνη στα ρηχά μέρη των λιθοκαλυμμάτων. Η κατανομή της πιο έντονης υδρολυτικής εξαλλοίωσης επεκτείνεται προς τα πάνω, με μια συνολική γεωμετρία μιας όρθιας χοάνης. Η έντονη υδρολυτική εξαλλοίωση διεισδύει βαθιά σε παλαιότερη ποτασσική εξαλλοίωση.

Η νατριοασβεστούχα εξαλλοίωση είναι ευρέως διαδεδομένη και καταλαμβάνει έναν όγκο σε σχήμα καμπάνας κάτω από την ποτασσική εξαλλοίωση. Η εξαλλοίωση αυτή είναι συνήθως φτωχή σε σουλφίδια και μέταλλα (εκτός από το Fe ως μαγνητίτης) αλλά μπορεί να φιλοξενήσει μεταλλοφορία σε κοιτάσματα πορφυριτικού Cu πλούσια σε Au. Η εξαλλοίωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως το αντίστροφο της ποτασσικής εξαλλοίωσης (Carten, 1986; Dilles et al., 1995), όπου ο K-άστριος αντικαθίσταται από ολιγόκλαστο και τα βασικά ορυκτά αντικαθίστανται από ακτινόλιθο και τιτανίτη, ή καταστρέφονται. Παραγενέσεις Na πλαγιόκλαστου-ακτινόλιθου (νατριοασβεστούχα εξαλλοίωση) και αλβίτη-επίδοτο-χλωρίτη-ανθρακικά (προπυλιτική εξαλλοίωση) σχηματίζονται από ένα ρευστό χαμηλής οξύτητας και συνήθως στερούνται μεταλλοφορίας.

Η σερικιτική εξαλλοίωση μπορεί να χωριστεί σε δύο διαφορετικούς τύπους, μια ασυνήθιστη, πρώιμη ποικιλία που είναι πρασινωπή έως πρασινωπή-γκρι σε χρώμα, και μία τελική πολύ πιο κοινή και διαδεδομένη, ποικιλία λευκού. Η σερικιτική εξαλλοίωση συνήθως κυριαρχείται από σιδηροπυρίτη, πράγμα που σημαίνει αποτελεσματική απομάκρυνση του Cu ($\pm$ Au). Η εξαλλοίωση αυτή στα κοιτάσματα πορφυριτικού Cu συνήθως υπερκαλύπτει και καταστρέφει πλήρως ή μερικώς τα ποτασσικές παραγενέσεις. Τόσο η σερικιτική όσο και η προπυλιτική εξαλλοίωση μπορεί να υπάρχουν μόνο στα υψηλότερα επίπεδα. Η έντονη σερικιτική εξαλλοίωση μπορεί να συνδέεται με πυριτίωση.

Η ενδιάμεση αργιλική εξαλλοίωση (Meyer and Hemley, 1967) είναι μια ασθενέστερη και χαμηλότερης θερμοκρασίας μορφή υδρολυτικής εξαλλοίωσης σε σύγκριση με τη σερικιτική εξαλλοίωση, και σχηματίζεται ως παρακμή σερικιτικής εξαλλοίωσης (Sillitoe, 1993, 2000, Arancibia and Clark, 1996). Ένα βασικό χαρακτηριστικό είναι η παρουσία του υπολλειμματικού αλκαλικού αστρίου σε πετρώματα πλούσια σε K.

Τα ανώτερα μέρη των πορφυριτικών συστημάτων, κυρίως σε ρηχότερα επίπεδα από τις πορφυριτικές διεισδύσεις τους, χαρακτηρίζονται από λιθοκαλύμματα δηλαδή λιθολογικά ελεγχόμενες ζώνες προχωρημένης αργιλικής εξαλλοίωσης (Sillitoe, 1995a). Τα περισσότερα λιθοκαλύμματα είναι μόνο διαβρωτικά υπολείμματα, τα οποία μπορούν να επικαλύπτουν πλήρως ή εν μέρει και να δείχνουν πορφυριτικά κοιτάσματα σε βαθύτερα επίπεδα (Sillitoe,

1999b) ή να εμφανίζονται δίπλα τους και, ως εκ τούτου, πάνω από το προπυλιτωμένο πέτρωμα (Lozada-Calderón and McPhail, 1996; Clode et al., 1999; Milu et al., 2004).

Γενικά οι φλέβες διαιρούνται σε τρεις ομάδες. Η πρώτη ομάδα αποτελείται από πρώιμα, χαλαζιακά και χωρίς σουλφίδια φλεβίδια που περιέχουν ακτινόλιθο, μαγνητίτη (τύπος Μ), (πρώιμο) βιοτίτη (τύπος ΕΒ) και Κ-άστριο και συνήθως στερούνται υδροθερμικών εξαλλοιώσεων που περιβάλλουν τις φλέβες. Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από φλεβίδια που φέρουν σουλφίδια που κυριαρχεί κοκκώδης χαλαζίας είτε με στενές είτε χωρίς εύκολα αναγνωρίσιμες υδροθερμικές εξαλλοιώσεις γύρω από τις φλέβες (τύποι Α και Β). Τέλος, η τρίτη ομάδα αποτελείται από ύστερες φλέβες κρυσταλλικού χαλαζία-σουλφιδίων και φλεβίδια με κυρίαρχες υδροθερμικές εξαλλοιώσεις που περιβάλλουν τις φλέβες χαλαζία (περιλαμβάνουν τον τύπο D). Οι φλέβες της πρώτης και της δεύτερης ομάδας τοποθετούνται κυρίως κατά την διάρκεια της ποτασικής εξαλλοίωσης ενώ η τρίτη ομάδα συνοδεύει τις σερικιτικές και βαθιά προχωρημένες αργιλικές επικαλύψεις.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ-ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Οι Ελληνίδες ζώνες που αντιπροσωπεύουν έναν γεωτεκτονικό σύνδεσμο μεταξύ της νότιας Βαλκανικής χερσονήσου και της Τουρκίας, δημιουργήθηκαν εξαιτίας της συνεχιζόμενης Αλπικής σύγκρουσης μεταξύ των πλακών της Αφρικής και της Ευρασίας από το Άνω Ιουρασικό μέχρι σήμερα, πάνω από την προς βορά βυθιζόμενη ελληνική ζώνη υποβύθισης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία εφιππεύσεων και στοίβαξης καλυμμάτων ΝΔ κλίσης τριών ηπειρωτικών τεμαχών (Αδριατική, Πελαγονική, Ροδόπη) καθώς και κλείσιμο των δύο παρεμβαλλόμενων ωκεανών (Βαρδάρη ή Αξιού και Πίνδου) της Νεοτηθύος (Robertson, 2002; Schmid et al., 2008; Jolivet and Brun, 2010; Ring et al., 2010; Kydonakis et al., 2015a, b; Menant et al., 2016; Brun et al., 2016). Η εξέλιξη της περιοχής χαρακτηρίζεται από το άνοιγμα και το κλείσιμο των ωκεάνιων λεκανών και του σχηματισμού του ηπειρωτικού φλοιού πάνω από τις ζώνες υποβύθισης (Anders et al., 2006; Himmerkus et al., 2006; Reischmann and Kostopoulos, 2007). Ο ωκεανός του Βαρδάρη άνοιξε κατά τη διάρκεια του Άνω Τριαδικού-Κάτω Ιουρασικού, χωρίζοντας τις ηπείρους της Πελαγονικής και της Ροδόπης (Robertson et al., 2013). Μετά το κλείσιμο των λεκανών του Βαρδάρη και της Πίνδου, σχηματίστηκαν ρήγματα αποκόλλησης μεγάλης κλίμακας που ξέθαψαν τα

σμπλέγματα μεταμορφικών πυρήνων. Η βορειοανατολική υποβύθιση δημιούργησε ένα μαγματικό τόξο Άνω Ιουρασικού κατά μήκος του νότιου περιθωρίου της Ροδόπης.

Οι Ελληνίδες, υπέστησαν δύο μεγάλες φάσεις παραμόρφωσης, ένα στάδιο συμπίεσης με εκλογιτικές προς αμφιβολιτικές φάσεις μεταμόρφωσης, που κορυφώθηκε κατά τη διάρκεια του Μέσου Κρητιδικού και μια έκταση που ξεκίνησε κατά τη διάρκεια του Κατώτερου Ηωκαίνου και η οποία συνεχίζεται τα τελευταία χρόνια, σε ένα οπισθοτόξιο περιβάλλον (Jolivet et al., 2013).

Η μάζα της Ροδόπης συνορεύει προς τα βόρεια με τη ζώνη διάτμησης Maritza που χωρίζει τη Ροδόπη από τη Srednogorie στη Βουλγαρία, και προς τα νότια από τη ζώνη συρραφής του Βαρδάρη. Επίσης, είναι ένα ετερογενές σώμα φλοιού που αποτελείται από τρεις κλάδους και συγκεκριμένα από το βόρειο τμήμα της Ροδόπης, το νότιο σύμπλεγμα μεταμορφικού πυρήνα της Ροδόπης και το τέμαχος της Χαλκιδικής που συμπίπτει με την μάζα Σερβομακεδονικής (εκτός από την ενότητα Κερδυλλίων η οποία ανήκει και έχει μια κοινή τεκτονο-μεταμορφική ιστορία με το νότιο μεταμορφικό σύμπλεγμα μεταμορφικού πυρήνα της Ροδόπης).

Το τμήμα της Βόρειας Ροδόπης αποτελείται από τρεις κύριες μεταμορφικές ενότητες. Συγκεκριμένα, αποτελείται από μια κατώτερη ενότητα υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης που περιλαμβάνει ορθογενέσιους, μια ενδιάμεση ενότητα πετρωμάτων του υποβάθρου υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης που έχουν τόσο ηπειρωτική όσο και ωκεάνια συγγένεια μεταξύ τους και μια υπερκείμενη ανώτερη μεσοζωική ενότητα χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης με τους οφιόλιθους της Περιροδοπικής και του Έβρου (Turpaud and Reischmann, 2010; Kirchenbaur et al., 2012; Meinhold and Kostopoulos, 2013; Bonev et al., 2015).

Το σύμπλεγμα μεταμορφικού πυρήνα της Νότιας Ροδόπης (SRCC) αποτελείται από Πέρμιο-Λιθανθρακοφόρους ορθογενέσιους και συμπαγή Τριαδικά μάρμαρα παρεμβαλλόμενα με αμφιβολιτικά και μεταπηλιτικά πετρώματα (Dinter et al., 1995; Brun and Sokoutis, 2007; Turpaud και Reischmann, 2010). Σε αυτό το σύμπλεγμα πυρήνα, η εκταφή των μεταμορφομένων πετρωμάτων εμφανίστηκε κατά μήκος των δύο μεγάλων ρηγμάτων αποκόλλησης, των Κερδυλλίων και του Στρυμόνα (Brun και Sokoutis, 2007; Wüthrich, 2009; Kounov et al., 2015).

Το τέμαχος Χαλκιδικής αντιπροσωπεύει ένα σύστημα εφίππευσης που αποτελείται από τέσσερις ενότητες με ΒΔ κλίση: την ενότητα Βερτίσκου που είναι ένα θραύσμα υποβάθρου προερχόμενο από την Γκοντβάνα και περιλαμβάνει το τέμαχος Θέρμη-Βόλβη-Γομάτι (TVG) το οποίο είναι ένα τεκτονικό mélange που χωρίζει την ενότητα αυτή από την Ενότητα των Κερδυλλίων, την Περιροδοπική Ζώνη η οποία αποτελείται από χαμηλού βαθμού

μεταμορφωμένα μεταϊζηματογενή και μεταηφαιστειακά πετρώματα Τριαδικής-Ιουρασικής ηλικίας που περιβάλλουν το κρυσταλλικό υπόβαθρο της Ενότητας Βερτίσκου (Meinhold and Kostopoulos, 2013), την Μαγματική Ενότητα Χορτιάτη και τους ανατολικούς οφιόλιθους του Βαρδάρη (Bonev et al., 2015; Kydonakis et al., 2015a, b; Siron et al., 2016).

Δύο στάδια έκτασης και σχηματισμού συμπλέγματος μεταμορφικού πυρήνα εμφανίστηκαν στην μάζα της Ροδόπης στα 42–35 Ma και 24–12 Ma (Wüthrich, 2009; Jolivet and Brun, 2010; Márton et al., 2010; Moritz et al., 2010; Burg, 2012; Jolivet et al., 2013; Kounov et al., 2015). Η πρώτη φάση του σχηματισμού του συμπλέγματος μεταμορφικού πυρήνα στη Ροδόπη (40–35 Ma) ήταν σύμφωνη με την υποβύθιση του ωκεανού της Πίνδου μετά την επαύξηση του ηπειρωτικού τεμάχους της Πελαγονικής στο περιθώριο της Ευρασίας (Brun και Faccenna, 2008, Wüthrich, 2009). Η δεύτερη φάση της έκτασης που σχετίζεται με το σύμπλεγμα μεταμορφικού πυρήνα έλαβε χώρα μετά τη συρραφή του ωκεάνιου τομέα της Πίνδου (35 Ma; Ring et al., 2010), και ήταν σύμφωνη με την επαύξηση και την υποβύθιση των ηπειρωτικών τεμαχών των εξωτερικών Ελληνίδων, και με την οπισθοτόξια έκταση που ξεκίνησε με την έναρξη της υποβύθισης του ωκεανού της Μεσογείου.

Στην μάζα Ροδόπης η εκταφή των συμπλεγμάτων μεταμορφικού πυρήνα κατά μήκος ρηγμάτων αποκόλλησης οδήγησαν στο σχηματισμό supra-detachment ιζηματογενείς λεκάνες ηλικίας Παλαιόκαινο έως Κάτω Ηώκαινο, άνω Ηώκαινο-Ολιγόκαινο και Μειόκαινο (Bonev et al., 2006a, b; Márton et al., 2010; Kilias et al., 2013a). Τα ρήγματα αποκόλλησης και οι supra-detachment λεκάνες ελέγχουν την τοποθέτηση των μαγμάτων, την κυκλοφορία των υδροθερμικών ρευστών και την απόθεση της μεταλλοφορίας.

Όσον αφορά το Αιγαίο, η Αττικοκυκλαδική ζώνη αποτελείται από τρεις κύριες ενότητες (Bonneau, 1984): την κατώτερη Ενότητα του Προαλπικού Κυκλαδικού Υποβάθρου, την ενδιάμεση Ενότητα των Κυκλαδικών Κυανοσχιστόλιθων και την ανώτερη Ενότητα της Πελαγονικής. Οι Κυκλάδες έχουν εκταφεί από το Ηώκαινο ως μεταμορφικά συμπλέγματα πυρήνα που σχηματίζονται σε περιβάλλοντα χαμηλής, μέσης ή/και υψηλής θερμοκρασίας (Menant et al., 2016). Επιπλέον, στο κάτω Μειόκαινο, στα κεντρικά της περιοχής αναπτύχθηκε υψηλής θερμοκρασίας και μέτριας πίεσης μεταμόρφωση (5–8,5 kbar, 500–700 C) και συναφείς μιγματίτες (Jolivet and Brun, 2010; Grasemann et al., 2012; Menant et al., 2016; Scheffer et al., 2016). Το αμφιβολιτικό έως πρασινοσχιστολιθικό μεταμορφικό γεγονός συνέβη κατά την εκταφή που σχετίζεται με την έκταση και ήταν σύμφωνο με οπισθοτόξια έκταση στη Ροδόπη στη βόρεια Ελλάδα (Altherr et al., 1982; Lister et al., 1984; Gautier και Brun, 1994; Jolivet et al., 2010; Ring et al., 2010).

Στην περιοχή του Αιγαίου επομένως, η εκταφή των μεταμορφικών συμπλεγμάτων πυρήνα κατά τη διάρκεια του Ολιγοκαίνου-Μειοκαίνου που έγινε κατά μήκος ρηγμάτων αποκόλλησης είχε ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό supra-detachment ιζηματογενών λεκανών Παλαιόκαινου έως Κάτω Μειοκαίνου, Άνω Ηώκαινου-Ολιγοκαίνου και Μειοκαίνου (Bonev et al., 2006a,b; Bonev and Beccaleto, 2007; Burchfiel et al., 2008; Brun and Sokoutis, 2007; Kiliyas et al., 2013). Το εκτατικό γεγονός επέτρεψε επίσης την διείδυση διαφόρων γρανιτοειδών (γρανίτης, γρανοδιορίτης, λευκογρανίτης) σε όλες τις Κυκλάδες μεταξύ 15 και 7 Ma (Altherr et al., 1982; Pe-Piper and Piper, 2002; Skarpelis et al., 2008). Ο Τριτογενής έως Τεταρτογενής ασβεσταλκαλικός έως αλκαλικός μαγματισμός εμφανίστηκε στην περιοχή του Αιγαίου πίσω από την ενεργή Ελληνική ζώνη υποβύθισης.

Η Ενότητα των Κυανοσχιστολίθων γνώρισε δύο στάδια μεταμόρφωσης κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς και αντιπροσωπεύει ένα πολυμεταμορφικό τέμαχος που επικαλύπτει τεκτονικά το υπόβαθρο των γνευσίων και αποτελείται από μια μεταμορφωμένη ηφαιστειοϊζηματογενή αλληλουχία κλαστικών μεταϊζηματογενών πετρωμάτων, μαρμάρων, ασβεστιτικών σχιστολίθων και βασικών και όξινων μεταπυριγενών πετρωμάτων (Parra et al., 2002; Bröcker and Pidgeon, 2007; Katzir et al., 2007; Ring et al., 2010; Jolivet et al., 2013; Scheffer et al., 2016). Η εκταφή των Κυκλαδικών Κυανοσχιστολίθων εμφανίστηκε για πρώτη φορά μεταξύ 45 και 35 Ma ετών. Η ανώτερη Ενότητα της Πελαγονικής δεν υπέστη μεταμόρφωση υψηλής πίεσης του Ηωκαίνου και εφειπέφτηκε πάνω στην ενότητα Κυανοσχιστολίθων στις 25-20 Ma (Boronkay and Doutsos, 1994).

Η γεωδυναμική εξέλιξη της περιοχής του Αιγαίου περιλαμβάνει slab roll-back (υποχώρηση πλάκας) με αποτέλεσμα την προοδευτική νότια μετανάστευση της μαγματικής δραστηριότητας από τις Κρητιδικές μαγματικές ζώνες Timok-Banat-Srednogorie μέχρι το Παλαιογενές-Νεογενές στην μάζα της Ροδόπης στη Βουλγαρία και στη βορειοανατολική Ελλάδα, έως σήμερα στο ηφαιστειακό τόξο του Νοτίου Αιγαίου (Jolivet and Brun, 2010), και του σχισίματος της πλάκας κάτω από τη δυτική Ανατολία κατά τη διάρκεια του Μειοκαίνου. Ως αποτέλεσμα του slab roll-back, η κατάρρευση της σφήνας και το άνοιγμα των οπισθοτόξιων λεκανών επέτρεψαν την μετα-ορογενετική εκταφή των κατώτερων τμημάτων του εκτεταμένου φλοιού ως μεταμορφικά συμπλέγματα πυρήνα, όπως στη Ροδόπη και στις Κυκλάδες, με έντονο μαγματισμό (Menant et al., 2016, 2018).

Τα πυριγενή πετρώματα άνω Ηώκαινου – Ολιγοκαίνου έχουν ασβεσταλκαλική, σωσσονιτική, έως υπερκαλιούχα συγγένεια και βασική-ενδιάμεση και όξινη σύσταση. Αυτά τα πετρώματα καλύπτουν μεγάλες περιοχές στο τμήμα της Ροδόπης και της Σερβομακεδονικής. Ο έντονος μαγματισμός μετά την υποβύθιση από το Ολιγόκαινο μέχρι το

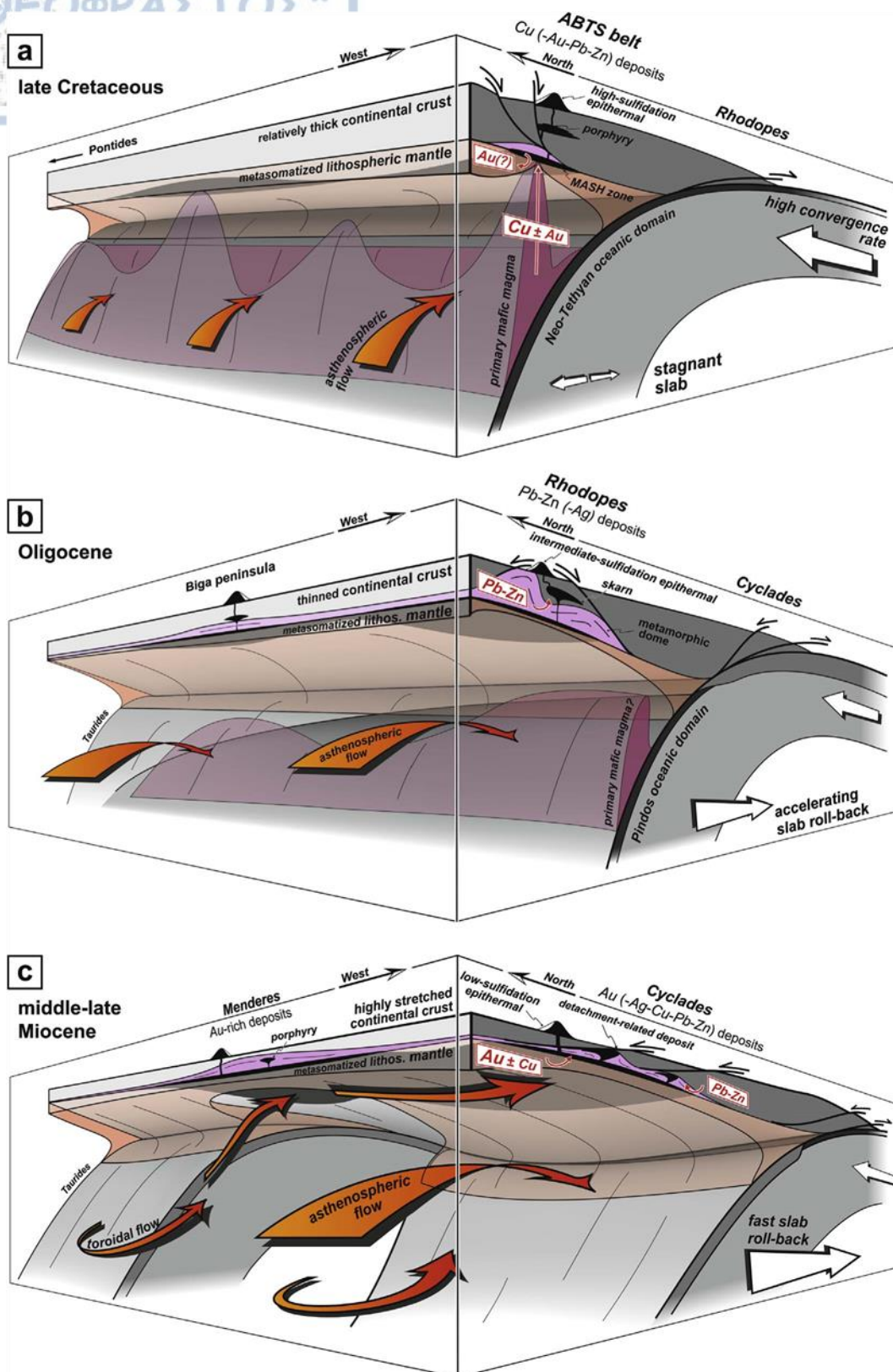
Μειόκαινο στην Ελλάδα (Σχ. 2), ήταν το αποτέλεσμα της ανύψωσης του ασθenoσφαιρικού μανδύα και της θερμικής διαταραχής του φλοιού και του υποκείμενου μανδύα (Pe-Piper and Piper 2002; Ersoy and Palmer, 2013; Menant et al., 2016). Ο μαγματισμός του Ολιγοκαίνου στη βόρεια Ελλάδα δείχνουν μειωμένη επιρροή της επιμόλυνσης από τον φλοιό με την πάροδο του χρόνου και μια αυξημένη είσοδο μαγμάτων από την ασθenoσφαιρα του μανδύα, μέχρι την έκρηξη καθαρά ασθenoσφαιρικών μαγμάτων (π.χ. αλκαλικών βασαλτών στο 28–26 MA; Marchev et al., 2004, 2005). Ο μαγματισμός εξελίχθηκε από πλούσιους σε Κ τραχειβασάλτες (34 Ma) μέσω σoσσωνίτες, ασβεσταλκαλικούς και υψηλού-Κ ασβεσταλκαλικούς βασάλτες (33–31 Ma), έως αλκαλικούς βασάλτες (28–26 Ma), και θεωρείται ότι έχουν προκύψει από την τήξη του εκπλυμένου μανδύα, μετασωματομένου από προηγούμενες διαδικασίες υποβύθισης (Cvetkovic et al., 2004, Marchev et al., 2005, 2013; Prelevic et al., 2005; Schefer et al., 2011; Bonev et al., 2013; Lehmann et al., 2013). Επιπλέον, θεωρείται ότι ο μαγματισμός του άνω Ηωκαίνου-Ολιγοκαίνου (35–25 Ma) στην μάζα της Ροδόπης προκλήθηκε από απομάκρυνση του λιθοσφαιρικού μανδύα και την επακόλουθη ανάδυση της ασθenoσφαιρας (Christofides et al., 2004; Marchev et al., 2005; Pe-Piper και Piper, 2006).

Όσον αφορά τον μαγματισμό του Κάτω Μειοκαίνου, στην περιοχή του βόρειου Αιγαίου εμφανίστηκε κυρίως στα νότια της πυριγενής Ολιγοκαινικής δραστηριότητας του τμήματος της Ροδόπης και ήταν σύμφωνη με την είσοδο του ωκεάνιου φλοιού της Μεσογείου στην ελληνική ζώνη υποβύθισης (Pe-Piper και Piper, 2002; Pe-Piper et al., 2009). Η ζώνη του Κάτω Μειοκαίνου σωσsoνιτικών και ασβεσταλκαλικών πλουτωνικών, υποηφαιστειακών και ηφαιστειακών πετρωμάτων εμφανίζεται στα νησιά Λέσβος και Λήμνος και εκτείνεται πιο δυτικά (π.χ., πορφυριτικός μονζονίτης στις Σκουριές, Kroll et al., 2002; Siron et al., 2016, 2018).

Από το Πλειόκαινο και μετά εξελίσσεται μία ηφαιστειότητα, με μέτριου Κ ασβεσταλκαλική σύσταση, κατά μήκος του ενεργού ηφαιστειακού τόξου του Νότιου Αιγαίου, που σχετίζεται με την ανάπτυξη της ζώνης υποβύθισης του Αιγαίου (Fytikas et al., 1984; Jolivet and Brun, 2010; Jolivet et al., 2013, 2015).

3. ΕΠΙΘΕΡΜΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

Τα χαρακτηριστικά των επιθερμικών κοιτασμάτων της Ελλάδας Ολιγοκαίνου, Μειοκαίνου και Πλειόκαινου-Πλειστόκαινου παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα 1.



Σχ. 2: Τρισδιάστατη σχηματική απεικόνιση της ανατολικής ζώνης υποβύθισης της Μεσογείου και των σχετικών διεργασιών του φλοιού και του μανδύα που ελέγχουν την τοποθέτηση των μεταλλογενετικών περιοχών στο Άνω Κρητιδικό, Ολιγόκαινο και Μέσο-Άνω Μειόκαινο (Πηγή: Menant, A., Jolivet, L., Tuduri, J., Loiselet, C., Bertrand, G., Guillou-Frottier, L., 2018).

3.1 Μάζα Ροδόπης και Περιοδοπική Ζώνη Ολιγοκαίνου

Λόφος Περάματος

Το κοίτασμα στο Πέραμα είναι ένα υψηλής και ενδιάμεσης θείωσης επιθερμικό σύστημα Au-Ag-Te-Se (Voudouris et al., 2011a) που βρίσκεται στο ανατολικό περιθώριο της τεκτονικής λεκάνης των Πετρωτών η οποία αντιπροσωπεύει μια supra-detachment λεκάνη του Ηωκαίνου-Ολιγοκαίνου γεμάτη με ηφαιστειακά-ιζηματογενή πετρώματα αλλά κυρίως από ασβεσταλκαλικά και σωσσονιτικά ηφαιστειακά πετρώματα.

Η μεταλλοφορία αποτελείται κυρίως από εναργίτη, λουζονίτη, τενναντίτη, τελλουρίδια Au-Ag, και αυτοφυή χρυσό και φιλοξενείται σε πυριτιωμένα και αργιλικά αλλοιωμένα ανδεσιτικά πετρώματα, συσσωματώματα και ψαμμίτες. Η μεταλλοφορία βρίσκεται στις φλέβες στον ανδেসίτη και πλούσια σε Au στρωματοειδής οξειδωμένη μεταλλοφορία στα υπερκείμενα ιζηματογενή πετρώματα. Τα σύνδρομα ορυκτά αποτελούνται από χαλαζία, βαρύτη, καολινίτη, σερίκίτη και φωσφορικά-θειικά-αργιλικά ορυκτά.

Το σύστημα μεταλλοφορίας εξελίχθηκε από μια αρχικά μέτρια υψηλής θερμοκρασίας (έως 330 °C) και χαμηλής αλατότητας ρευστό σε ένα δροσερό (200 °C) και πολύ χαμηλής αλατότητας ρευστό που υποδηλώνει προοδευτική ψύξη και αραίωση. Τα αποδεδειγμένα και τα πιθανά αποθέματα είναι 9,7 Mt που περιέχουν 3,13 g/t Au και 4 g/t Ag, για συνολικά 0,975 Moz Au και 1,151 Moz Ag (Eldorado Gold Corp., 2017).

Μαυροκορυφή

Το κοίτασμα Μαυροκορυφής στο κεντρικό τμήμα της τεκτονικής λεκάνης των Πετρωτών, αποτελείται από ρηχή υψηλής θείωσης επιθερμικού Ag-Cu-Te μεταλλοφορία μέσα σε έναν ανδεσιτικό θόλο λάβας και σε υαλοκλαστίτες, και μοιράζεται πολλές ομοιότητες με τα βαθύτερα επίπεδα του γειτονικού κοιτάσματος του Περάματος.

Οι κύριες υδροθερμικές μορφές εξαλλοίωσης είναι η πυριτίωση και η προχωρημένη αργιλική, με μια ορυκτολογία χαλαζία, οπάλιου, αλουνίτη, δευτερεύον σμηκτίτη, καολινίτη, σιδηροπυρίτη και μαρκασίτη (Voudouris, 2011). Τα πολύτιμα μέταλλα πιθανότατα μεταφέρθηκαν σε μαγματικούς ατμούς ταυτόχρονα με τον σχηματισμό προχωρημένης αργιλικής αλλοίωσης (Voudouris, 2011).

Η μεταλλοφορία σχηματίζεται υπό πολύ οξειδωτικές συνθήκες σε θερμοκρασίες από 200 °C έως 250 °C και εμφανίζεται κυρίως ως συμπαγή σώματα σουλφιδίων και φλεβίδια, που αποτελούνται κυρίως από σιδηροπυρίτη, φαματινίτη, ακανθίτη, φερμπερίτη που συνδέονται με την πυριτίωση (Voudouris, 2011). Η ζώνη μεταλλοφορίας περιέχει έως 1,5 g/t Au και έως 162 ppm Ag.

Πίν. 1. Πίνακας χαρακτηριστικών επιθερμικών κοιτασμάτων στην Ελλάδα. HR: Host Rock; ALT: Alteration; MIN: Mineralization.

Deposit name	Ore district	Geotectonic belt or unit	Commodities	Deposit style
Perama Hill	Petrota Graben	Circum-Rhodope Belt	Au Ag Cu Bi Pb Te Se	High and intermediate sulfidation
Mavrokoryfi	Petrota Graben	Circum-Rhodope Belt	Ag Au Cu Te	High sulfidation
Viper	Kirki-Sapes-Kassiteres	Circum-Rhodope Belt	Cu Au As Sb Ag Pb Zn Bi Te Se	High and intermediate sulfidation
Scarp	Kirki-Sapes-Kassiteres	Circum-Rhodope Belt	Cu Au	High sulfidation
St. Demetrios	Kirki-Sapes-Kassiteres	Circum-Rhodope Belt	Cu Au As Sb Ag Pb Zn Bi Te Se	High and intermediate sulfidation
St. Barbara	Kirki-Sapes-Kassiteres	Circum-Rhodope Belt	Cu Au As Sb Ag Pb Zn Bi Te Se	High and intermediate sulfidation
St. Philippos	Kirki-Sapes-Kassiteres	Circum-Rhodope Belt	Pb Zn Ag As Cu Bi Sn Cd In Ga Ge Au	Intermediate and high sulfidation
Pefka	Evros	Circum-Rhodope Belt	Cu Au Ag Pb Zn Bi Sn Ge Ga In Mo V As Hg Te Se	High and intermediate sulfidation
Loutros	Evros	CircumRhodope Belt	Fe Pb As Ag	Intermediate sulfidation
Kalotycho	Kalotycho-Melitena	Rhodope massif	Fe	High sulfidation
Fakos (Limnos)		Rhodope massif-Pontide Unit	Cu Mo Au Ag Bi Te As Sb Zn Pb	High and intermediate sulfidation
Megala Therma (Lesvos)		Rhodope-Pontide Unit	Au Ag Pb Zn Fe Cu Mo	Intermediate sulfidation
Profitis Ilias (Milos)	Attic-Cycladic ore belt	Attic-Cycladic crystalline Belt	Pb Zn Ag Au Cu Sb Te	Intermediate sulfidation
Chondro Vouno (Milos)	Attic-Cycladic ore belt	Attic-Cycladic crystalline Belt	Pb Zn Ag Au Cu Sb Te	Intermediate sulfidation
Triades-Galana (Milos)	Attic-Cycladic ore belt	Attic-Cycladic crystalline Belt	Ag Au As Bi W Mo	Intermediate sulfidation
Kondaros-Katsimouti-Vani (Milos)	Attic-Cycladic ore belt	Attic-Cycladic Crystalline Belt	Ag Au As Bi W Mo	Intermediate sulfidation

(Πίν. 1. συνέχεια)

Deposit name	Morphology of ore bodies	Main host rocks	Age:HR, ALT, MIN	Tonnage and grades	References
Perama Hill	upper parts: oxidized deeper parts: disseminated, vein, massive sulfide lodes	Andesite, conglomerate, sandstone	Oligocene	Reserves: 9.697 Mt at 3.13 g/t Au and 4 g/t Ag, with a total of 0.975 Moz Au and 1.151 Moz Ag	Voudouris et al., 2010; Eldorado Corp.
Mavrokoryfi	Vein, massive sulfide lodes, breccia	Andesite, hyaloclastite	Oligocene		Voudouris et al., 2010
Viper	Breccia, disseminated, veinlets, vugs, fillings	Granodiorite-tonalite porphyry, tuff, rhyodacite	Oligocene	Resources: 0.28 Mt at 19.5 g/t Au, 9 g/t Ag, and 0.4% Cu	Voudouris et al., 2010; Resources
Scarp	Breccia, disseminated	Granodiorite-tonalite porphyry, tuff, rhyodacite	Oligocene	Resources: 0.87 Mt at 2.2 g/t Au, and 1.5 g/t Ag	Ortelli et al., 2010; Resources
St. Demetrios	Breccia, disseminated, veinlets, vugs, fillings	Granodiorite-tonalite porphyry, tuff, rhyodacite	Oligocene (ALT: 31.9 ± 0.6 Ma)	Reserves: 0.21 Mt at 3.5 g/t Au, and 5.2 g/t Ag	Voudouris et al., 2010; et al., 2013; Glory Resources, 2012; Voudouris et al., 2010
St. Barbara	Veins, breccia	Andesite, tuff, monzodiorite	Oligocene (ALT: 31.2 ± 0.4 Ma)		Voudouris et al., 2010
St. Philippos	Vein, breccia, disseminated	Sandstone, conglomerate, marl, tuff, microgranite porphyry	Oligocene	Past mining produced 0.2 Mt at 7.5 % Pb + Zn	Voudouris et al., 2013b
Pefka	Veins	Tuffs, andesite, rhyodacite, latite	Oligocene (HR: 30.7 Ma)		Voudouris et al., 2015

(Πίν. 1. συνέχεια)

Deposit name	Morphology of ore bodies	Main host rocks	Age:HR, ALT, MIN	Tonnage and grades	References
Loutros	Veins	Rhyolite	Miocene (HR: 19.53 ± 0.75 Ma)		Melfos and Voudouris, 2016
Kalotycho	Veins	Tuffs, andesite, trachyte, dacite,	Oligocene (HR: 33 ± 1.2 to 24.6 ±		Innocenti et al., 1984;

		rhyolite	0.6 Ma)		Voudouris and Melfos, 2012
Fakos (Limnos)	Stockwork, breccia, disseminated, vein	Quartz monzonite porphyry	Miocene(HR:21.3 ± 0.7 to 20.2 ± 0.2 Ma)		Voudouris and Alfieris, 2005; Fornadel et al., 2012
Megala Therma (Lesvos)	Veinlets, veins, breccia	Andesite, latite	Miocene (HR: 21.5 ± 1.5 Ma)		Pe-Piper and Piper, 1993; Voudouris and Alfieris, 2005
Profitis Ilias (Milos)	Massive to semi-massive ore, veins	Rhyolite, pyroclastic rocks	Pliocene to Pleistocene (HR:2.7M)	Reserves: 5 Mt at 4.4 g/t Au	Kilias et al.,2001; Naden et al.,2005; Alfieris et al., 2013
Chondro Vouno (Milos)	Veins	Pyroclastic rocks	Pliocene to Pleistocene (HR:2.7M)	Reserves: 3.3 Mt at 4.2 g/t Au	Kilias et al.,2001; Naden et al.,2005; Alfieris et al., 2013
Triades-Galana (Milos)	Veins	Dacites, andesites, pyroclastic and volcanosedimentary rocks	Pliocene to Pleistocene(HR: 2.5to 1.4 Ma)	Resource s: 1.2 Mt at 1 g/t Au and 124 g/t Ag	Stewart and McPhie 2006; Alfieris et al., 2013
Kondaros-Katsimouti-Vani (Milos)	Massive to semi-massive ore, veins, stratabound and stratiform layers	Dacite, andesite, pyroclastic and volcanosedimentary rocks	Pliocene to Pleistocene (HR: 2.5to 1.4 Ma)		Alfieris et al.,2013; Papavassiliou et al., 2017

Viper (Οχιά)

Η περιοχή Σάπες-Κασσιτερές περιλαμβάνει πάνω από είκοσι HS-IS-LS επιθερμικά κοιτάσματα Au που φιλοξενούνται από ηφαιστειακά πετρώματα του Ολιγοκαίνου. Μερικά από τα πιο σημαντικά είναι το Viper καθώς και ο Άγιος Δημήτριος, και η Αγία Βαρβάρα που θα αναφερθούν στην συνέχεια. Τα αποθέματα της περιοχής είναι 1,3 Mt 15 g/t Au για 637 koz (70% πόρος στο Viper; Eldorado Gold).

Το σύστημα μεταλλοφορίας περιλαμβάνει πορφυριτική μεταλλοφορία που φιλοξενείται σε γρανοδιορίτη, στην οποία τοποθετείται ένα προχωρημένο αργιλικό λιθοκάλυμμα. Η πορφυριτικού τύπου μεταλλοφορία εξελίχθηκε σε επιθερμική μεταλλοφορία υψηλής θείωσης που φιλοξενείται από ηφαιστειακά.

Το κοίτασμα Viper σχετίζεται με μια απότομης βύθισης, βορειοδυτικής κλίσης φλεβική ζώνη. Επιπλέον, περιέχει μία ζώνη χρυσού- σουλφιδίων υψηλής θείωσης, εμπλουτισμένη σε σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, γαληνίτη, εναργίτη, τετραεδρίτη-τενναντίτη, τελλουρίδια Au-Ag και αυτοφυή χρυσό σε βάθος 200-250 m. Τα ορυκτά της μεταλλοφορίας είναι παρόμοια με αυτά του Αγίου Δημητρίου το οποίο θα αναφερθεί στη συνέχεια και αποτελούνται κυρίως από πρώιμο σιδηροπυρίτη, ακολουθούμενα από σφαλερίτη, γαληνίτη, χαλκοπυρίτη, βορνίτη και τελλουρίδια, και στη συνέχεια από σιδηροπυρίτη και από εναργίτη / λουζονίτη. Ο χρυσός εμφανίζεται με τη μορφή αυτοφύους χρυσού και τελλουριδίων χρυσού, και συνήθως σχετίζονται με τον εναργίτη και τον αλουνίτη. Ο αυτοφύης χρυσός εμφανίζεται σε όλη την παραγενετική ακολουθία.

Άγιος Δημήτριος

Το κοίτασμα του Αγίου Δημητρίου φιλοξενείται σε γρανοδιοριτικό πορφύρη. Μια βαθιά πορφυριτικά σχετιζόμενη πυριτική και προχωρημένη αργιλική εξαλλοίωση περιλαμβάνει κορούνδιο, διάσπορο, APS ορυκτά και τοπάζιο (Michael, 2004) και υπόκειται σε μεταβατικές προχωρημένες αργιλικές-σερικιτικές και σερικιτικές ζώνες.

Το συγκεκριμένο κοίτασμα περιέχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε χρυσό που σχετίζεται με οξειδωμένη μεταλλοφορία στην επιφάνεια (κατά μέσο όρο 2 g/t) και μεταλλοφορία σιδηροπυρίτη-χαλκοπυρίτη-εναργίτη με βαθμούς έως 22 g/t βάθους (Border et al., 1999). Λιθοκαλύμματα προχωρημένης αργιλικής εξαλλοίωσης (συμπεριλαμβανομένων των ζωνών τροφοδοσίας τους) βρίσκονται κυρίως στην κορυφή των λόφων στον Άγιο Δημήτριο καθώς επίσης στον λόφο Κώνο, στις Κορυφές, στη Σαπάνα και στην Αγία Βαρβάρα.

Η μεταλλοφορία επιθερμικού Au-Ag εμφανίστηκε σε δύο κύρια στάδια μετά το σχηματισμό της πρώιμης πυριτώσεως υψηλής θείωσης (Voudouris, 1993; Michael, 2004; Voudouris et al., 2006). Το στάδιο I αποτελείται από ενδιάμεσης θείωσης φλέβες αμέθυστου-χαλκηδόνιου-γαλακτώδους χαλαζία συμπεριλαμβανομένων σουλφιδίων βασικών μετάλλων, τετραεδρίτη-τενναντίτη, τελλουρίδια και αυτοφυή χρυσό. Το στάδιο II αποτελείται από ένα συγκρότημα υψηλής θείωσης που αποτελείται από εναργίτη, αυτοφυή χρυσό και φτωχό σε Fe σφαλερίτη.

Η εναπόθεση μεταλλοφορίας υποβλήθηκε μια εξέλιξη από μια ενδιάμεση κατάσταση θείωσης (σφαλερίτης-γαληνίτης-χαλκοπυρίτης-βορνίτης και τελλουρίδια που φέρουν Au-Ag) προς υψηλές, ή πολύ υψηλές καταστάσεις θείωσης (εναργίτης και κοβελίνης με αλουνίτη). Τα κοιτάσματα Viper και Αγίου Δημητρίου δείχνουν μια στενή χωρική σχέση με κοιτάσμα το πορφυριτικού Cu-Mo-Re του λόφου Κώνου (Voudouris et al., 2006; Ortelli et al., 2009).

Αγία Βαρβάρα

Το κοιτάσμα της Αγίας Βαρβάρας είναι ένα τηλεσκοπικό υψηλής-ενδιάμεσης θείωσης επιθερμικό σύστημα που φιλοξενείται από δακτιλικές-ανδεσιτικές λάβες, πυροκλαστικά πετρώματα και διεισδυτικά πετρώματα.

Στην Αγία Βαρβάρα, υπάρχει μια κατακόρυφη ζώνωση μέσω του επιθερμικού συστήματος. Σε βαθύτερα επίπεδα, IS επιθερμικές γαλακτώδεις χαλαζιακές-ασβεστιτικές φλέβες που φέρουν τελλουρίδια, φιλοξενούνται από σερικιτικά-αργιλικά και ενδιάμεσα αργιλικά εξαλλοιωμένα πετρώματα. Αυτές οι φλέβες σε ακόμη υψηλότερα υψόμετρα διασχίζουν την πυριτική και προχωρημένη αργιλική εξαλλοίωση.

Η μεταλλοφορία αποτελείται κυρίως από σουλφίδια, θειοάλατα, τελλουρίδια Au-Ag και ηλεκτρόδιο ως διάσπαρτα σύνολα ή λεπτές ταινίες μέσα τις φλέβες. Χημικές αναλύσεις επιφανειακών δειγμάτων από το κοιτάσμα έδωσαν αυξημένες συγκεντρώσεις Au (έως 11 g/t), Ag (έως 21 ppm), Cu (370 ppm), Pb (έως 950 ppm), As (έως 820 ppm), Bi (έως 640 ppm), Mo (έως 72 ppm), Te (έως 13 ppm) και Se (έως 23 ppm) (Voudouris et al., 2006).

Άγιος Φίλιππος

Το επιθερμικό ενδιάμεσης έως υψηλής θείωσης φλεβικό κοιτάσμα Αγίου Φιλίππου Pb-Zn-Ag-Bi-Sn-In βρίσκεται στην μεταλλοφορία της Κίρκης, φιλοξενείται από Ηωκαινικά ιζήματα και σχετίζεται γενετικά με μικρογρανιτικό πορφύρη (Voudouris et al., 2013a).

Το συγκεκριμένο κοιτάσμα περιλαμβάνει μια ασυνήθιστη ορυκτολογία που αποτελείται από αρκετά θειοάλατα Pb-As-Cu-Ag-Bi-Sn (Moëlo et al., 1985; Vavelidis et al., 1989; Michailidis et al., 1989; Dimou, 1993; Skarpelis, 1999a; Voudouris et al., 2013b). Νέες παραγενετικές σχέσεις για την μεταλλοφορία στο κοιτάσμα του Αγίου Φιλίππου υποδηλώνουν μια εξέλιξη από συνθήκες υψηλής θείωσης προς μια κατάσταση υγρού ενδιάμεσης θείωσης. Ο δικίτης, αλουνίτης, πυροφυλλίτης, βαρύτης και ο ασβεστίτης είναι τα κύρια ορυκτά εξαλλοίωσης.

Χημικές αναλύσεις υποδεικνύουν υψηλές συγκεντρώσεις Mo (έως 62 ppm), Ag (> 100 ppm), Au (έως 0,3 g/t), Bi (> 2000 ppm), Se (έως 12 ppm), Te (έως 43 ppm), In (έως 95

ppm), Ga (έως 290 ppm) και Ge (> 100 ppm) (Voudouris et al., 2013a). Νέες μελέτες υποδηλώνουν έως 2,5 g/t Au. Ο βουρτσίτης και ο σφαλερίτης περιέχουν σημαντικές ποσότητες In και Ga ενώ το Ge υπάρχει σε μικρότερο ποσοστό (Driesner and Pintea, 1994). Το περιεχόμενο σε Te είναι υψηλό καθώς υπάρχουν τελλουρίδια στην μεταλλοφορία.

Πεύκα

Στην περιοχή Πεύκα-Λουτρός βρίσκεται το επιθερμικό κοίτασμα των Πεύκων το οποίο χαρακτηρίζεται από μια υψηλής-ενδιάμεσης θείωσης μεταλλοφορία Cu-Au-Ag-Te καθώς και η ενδιάμεσης θείωσης επιθερμική μεταλλοφορία του Λουτρού. Όσον αφορά το κοίτασμα των Πεύκων η μεταλλοφορία φιλοξενείται μέσα σε ανδεσιτικά έως ρυολιθικά ηφαιστειακά πετρώματα. Δύο ξεχωριστές μορφές μεταλλοφορίας που παρατηρήθηκαν σε εκείνη την περιοχή (Voudouris, 2006; Repstock et al., 2015) είναι οι πρώιμες φλέβες υψηλής θείωσης με εναργίτη, Bi-θειοάλατα και χρυσό και οι ύστερες φλέβες ενδιάμεσης θείωσης με τενναντίτη / τετραεδρίτη και τελλουρίδια Au-Ag. Οι κύριες μορφές εξαλλοίωσης είναι η πυριτίωση, η σερικιτίωση και η προχωρημένη αργιλική εξαλλοίωση.

Το κοίτασμα των Πεύκων περιέχει μία εξαιρετική και σπάνια ορυκτολογία που περιλαμβάνει πολλά σουλφίδια, θειοάλατα, τελλουρίδια, αυτοφυή στοιχεία και τα σπάνια θειοάλατα του Cu μαζί με τετραεδρίτη-τενναντίτη πλούσιου σε Cu (Repstock et al., 2015, 2016).

Οι αναλύσεις μεταλλοφόρων δειγμάτων και από τις δύο μορφές επιθερμικής μεταλλοφορίας που αναφέρθηκαν παραπάνω περιέχουν έως και 10 ppm Au, έως 23,5 ppm Mo, έως 105 ppm Bi, έως 468 ppm Te, πάνω έως 675 ppm In, 17 ppm Ga, 6 ppm Ge, > 100 ppm Ag, > 1 wt % Cu και > 1 wt % As (Melfos and Voudouris, 2012;). Οι ανωμαλίες Mo στα Πεύκα υπέδειξαν την παρουσία ενός θαμμένου πορφυριτικού τύπου κοιτάσματος σε βάθος.

Καλότυχο

Στο Καλότυχο το επιθερμικό σύστημα υψηλής θείωσης καλύπτει μία μεγάλη περιοχή κατά μήκος των ελληνοβουλγαρικών συνόρων. Το κοίτασμα αυτό φιλοξενείται από Ολιγοκαινικά ασβεσταλκαλικά και σωσσονιτικά ηφαιστειακά πετρώματα τα οποία περιλαμβάνουν ανδεσίτες, δακίτες, τραχείτες, ρεοδακτιτικούς ιγκνιμβρίτες και ρυόλιθους, οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε ΒΑ-ΝΔ κλίσης ιζηματογενείς λεκάνες που περιέχουν Ηωκαινικά-Ολιγοκαινικά βασαλτικά κροκαλοπαγή και ψαμμίτες (Eleftheriadis, 1995). Μια επιθερμικού

τύπου εξαλλοίωση υψηλής θείωσης και μεταλλοφορία συμπαγούς σιδηροπυρίτη αναπτύχθηκε κατά μήκος ΒΔ και Α-Δ κλίσης ρηγμάτων και χαρακτηρίζεται από προχωρημένη αργιλική εξαλλοίωση (Voudouris and Melfos, 2013). Η προχωρημένη αργιλική ζώνη εξαλλοίωσης κυριαρχείται από αλουνίτη και αυτοφύες θείο, ενώ η σερικιτική-αργιλική εξαλλοίωση, η οποία είναι κυρίως εκτεθειμένη γύρω από την προχωρημένη αργιλική ζώνη, περιέχει χαλαζία, σερικήτη, και ελάχιστο καολινίτη και πυροφυλλίτη.

Καλλυντήρι

Στην περιοχή Καλλυντήρι η μεταλλοφορία σχετίζεται με αρσеноπυρίτη, αντιμονίτη, κόκκινη σανδαράχη, σουλφίδια βασικών μετάλλων και διάφορα θειοάλατα του Sb-Pb-Ag (Kanellopoulos et al., 2014). Διάφορες επιθερμικού τύπου φλέβες χαλαζία-βαρύτη-ανθρακικών-αντιμονίτη διασχίζουν μεσοζωικά μάρμαρα της μάζας της Ροδόπης και ψαμμίτες του Ηώκαινου-Ολιγοκαίνου, εντός και πάνω από ένα ρήγμα αποκόλλησης. Η εξαλλοίωση περιλαμβάνει πυριτίωση, καολινίωση και σερικιτίωση. Ο χρυσός και οι ανωμαλίες Te πιθανώς να υποδηλώνουν σε βάθος πορφυριτικού τύπου μεταλλοφορία (Kanellopoulos et al., 2014).

3.2 Μάζα Ροδόπης και Περιοδοπική Ζώνη Μειοκαίνου

Φακός

Στην Λήμνο και συγκεκριμένα στον Φακό βρίσκεται το επιθερμικό κοίτασμα Au-Ag-Te συνδέεται με χαλαζιακά μονζονιτικά και σωσσονιτικά ηφαιστειακά πετρώματα που διείσδυσαν το Ηώκαινο σε Μειοκαινικά ιζηματογενή πετρώματα (Voudouris and Alfieris, 2005; Fornadel et al., 2012). Η επιθερμική μεταλλοφορία στο νησί υπέρκειται ή εμφανίζεται περιφερειακά στο πορφυριτικό σύστημα του Φακού (Voudouris and Alfieris, 2005). Το φλεβικό σύστημα περιλαμβάνει πολυμεταλλικές φλέβες σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, σφαλερίτη, γαληνίτη, εναργίτη, χαλαζία ± τουρμαλίνη ± βαρύτη ± ασβεστίτη (Voudouris and Skarpelis, 1998) αυτοφυή Au και κράμα Au-Ag (Voudouris and Alfieris, 2005). Οι χημικές αναλύσεις πετρωμάτων επιφανειακών δειγμάτων από το κοίτασμα του Φακού δείχνουν εμπλουτισμό σε Au έως 11 ppm, Ag έως 11,3 ppm, Cu έως 780 ppm.

Μεγάλα Θερμά

Στην Λέσβο, βόρεια της καλντέρας της Στύψης, IS-LS επιθερμικές χαλαζιακές ανθρακικές φλέβες κατά μήκος ρηγμάτων BBA, ΒΔ και ΒΑ κλίσεων φιλοξενούν το

ενδιάμεσης θείωσης επιθερμικό κοιτάσμα Pb-Zn-Cu-Ag-Au στα Μεγάλα Θερμά (Kontis et al., 1994; Voudouris and Alfieris, 2005). Οι φλέβες είναι εμπλουτισμένες σε Au (έως 21 ppm), Ag, Pb, Zn, Cu και Mo (Kontis et al., 1994) και χαρακτηρίζονται από σιδηροπυρίτη ακολουθούμενος από ορυκτά σφαλερίτη, χαλκοπυρίτη, γαληνίτη, ορυκτά της ομάδας του τετραεδρίτη, πολυμπίτη πλούσιο σε Te, στεφαννίτη και κράμα Au-Ag (Kontis et al., 1994; Periferakis et al., 2017, 2018). Οι κύριες μορφές εξαλλοίωσης η πυριτική, προπυλιτική, αργίλική, και η αδουλάρια-σερικιτική.

3.3 Αττικοκυκλαδική Ζώνη Πλειόκαινου-Πλειστόκαινου

Μήλος

Η Μήλος που βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του ενεργού ηφαιστειακού τόξου του Νότιου Αιγαίου με ηλικία από το Κάτω Πλειόκαινο έως σήμερα, είναι μία από τις πιο πυκνά μεταλλοφόρες περιοχές στην Ελλάδα, που χαρακτηρίζονται από ενδιάμεσης θείωσης επιθερμικού κοιτάσματα Au-Ag-Te και βασικών μετάλλων κάτω από μεταβατικά ρηχές υποθαλάσσιες έως υποαέριες συνθήκες, (Vavelidis and Melfos, 1998; Kilias et al., 2001; Naden et al., 2005; Alfieris et al., 2013; Papavassiliou et al., 2017). Η ασβεσταλκαλική μαγματική δραστηριότητα δημιούργησε όξινα έως βασικά ηφαιστειακά και υποηφαιστειακά πετρώματα (Fytikas et al., 1986; Stewart and McPhie, 2006; Alfieris et al., 2013). Η επιθερμικού τύπου μεταλλοφορία της Μήλου συμπεριλαμβάνει το κοιτάσμα Au-Ag-Te στον Προφήτη Ηλία (5 Mt στα 4,4 g/t Au) που περιλαμβάνει ηλεκτρόδιο και τελλουρίδια Au-Ag, και στο Χονδρό Βουνό (3,3 Mt στα 4,2 g/t Au), το κοιτάσμα Pb-Zn-Cu-Ag-Au στις Τριάδες-Γαλανά (αποθέματα: 1,2 Mt στα 1 g/t Au και 124 ppm Ag) που περιλαμβάνει θειοάλατα που φέρουν Ag και στην περιοχή Κοντάρου-Κατσιμούτη-Βάνι. Το κοιτάσμα Ag στο Βάνι είναι μια IS επιθερμική μεταλλοφορία που βρίσκεται κατά μήκος ρηγμάτων ΒΔ και ΒΑ κλίσης.

Τα κοιτάσματα συνδέονται στενά με ενεργά γεωθερμικά συστήματα που χαρακτηρίζονται από ανάμιξη θαλασσινού, μετεωρικού και λιγότερου μαγματικού νερού (Naden et al., 2005; Alfieris et al., 2013; Papavassiliou et al., 2017).

Κολούμπο

Το ρηχό-υποθαλάσσιο εντός του τόξου ηφαίστειο Κολούμπο και το σχετικό όξινο υδροθερμικό πεδίο, ειδικά στο βόρειο τμήμα του κρατήρα, παράκτιο της Σαντορίνης, χαρακτηρίζεται από ακραίους εμπλουτισμούς σε Sb και Hg, As, Au, Ag, και Zn σε πολυμεταλλικές μεταλλοφορίες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν ένα υβριδικό πυθμένα ανάλογο ενός επιθερμικού κοιτάσματος συμπαγών σουλφιδίων (S.P. Kilias et al., 2013b). Η μεταλλοφορία φιλοξενείται σε ρηχό βάθος (γύρω στα 500 μέτρα) με τα υδροθερμικά ρευστά

να φτάνουν τους 220°C από καμινάδες έως 4 μέτρα ύψος (Sigurdsson et al., 2006). Ο σχηματισμός πολυμεταλλικών σουλφιδίων σε ηφαιστειακά τόξα είναι πολύ κοινός έχοντας το χαρακτηριστικό της υποθαλάσσιας προς υποαέριας μετάβασης (Hannington et al., 2005).

4. ΠΟΡΦΥΡΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

Τα χαρακτηριστικά των πορφυριτικών κοιτασμάτων της Ελλάδας του Ολιγοκαίνου, Μειοκαίνου και Πλειόκαινου-Πλειστόκαινου παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα 2. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από αυτά τα κοιτάσματα.

4.1 Μάζα Ροδόπης και Περιοδοπική Ζώνη Ολιγοκαίνου

Μαρόνεια

Η μεταλλοφορία πορφυριτικού Cu-Mo-Re-Au της Μαρόνειας φιλοξενείται μέσα σε ένα μικρογρανιτικό πορφύρη που τοποθετείται εντός του πλουτωνίτη της Μαρόνειας, ο οποίος αποτελείται κυρίως από μονζονίτη. Οι μορφές εξαλλοίωσης που κυριαρχούν είναι οι νατριοασβεστούχα, η ποτασσική, η προπυλιτική, η σερικιτική και η αργιλική. Η μεταλλοφορία σχετίζεται κυρίως με τρεις εξαιρετικά πυριτωμένες ζώνες εντός της σερικιτικής ζώνης (Melfos et al., 2002, 2020).

Η εναπόθεση της μεταλλοφορίας πραγματοποιήθηκε μεταξύ 320 ° και 460 ° C. Ο βρασμός των μεταλλοφόρων ρευστών, μαζί με αναμεμειγμένα επιφανειακά ρευστά, θεωρείται η κύρια υπεύθυνη διαδικασία για την εναπόθεση των μεταλλικών ορυκτών (Melfos et al., 2002).

Τα μεταλλικά ορυκτά αποτελούνται από σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, μαγνητίτη, μολυβδαινίτη (έως 2,9wt % Re), βισμούθινίτη και διάφορα θειοάλατα. Σύμφωνα με επιφανειακά δείγματα υπάρχουν συγκεντρώσεις έως 7600 ppm Mo, 5460 ppm Cu, ενώ δείγματα που εμφανίζονται στον πυρήνα γεώτρησης περιέχουν 12 g/t Au, 17 ppm Ag και 2 wt% Cu τα οποία υποδηλώνουν επιθερμική επικάλυψη υψηλής θείωσης.

Πίν. 2. Πίνακας χαρακτηριστικών πορφυριτικών κοιτασμάτων στην Ελλάδα. HR: Host Rock; ALT: Alteration; MIN: Mineralization.

Deposit name	Ore district	Geotectonic belt or unit	Commodities	Deposit style
Maronia		Circum-Rhodope belt	Cu Fe Mo Au Pb Zn Sb As	High-K calc-alk Cu-Mo
Pagoni Rachi	Kirki-SapesKassiteres-Esimi	Circum-Rhodope belt	Cu Mo Fe Re	High-K calc-alk Cu-Mo

Konos	Kirki-Sapes-Kassiteres-Esimi	Circum-Rhodope belt	Cu Mo Fe Re	High-K calc-alk Cu-Mo
Koryfes	Kirki-Sapes-Kassiteres-Esimi	Circum-Rhodope belt	Cu Au Mo Pb Zn Ag Bi Te	High-K calc-alk Cu
Myli	Kirki-Sapes-Kassiteres-Esimi	Circum-Rhodope belt	Cu Mo Au Re Pb Zn Ag As	High-K calc-alk Cu-Mo
Melitena	Kalotycho-Melitena	Rhodope massif	Mo Cu Fe Re Pb	High-K calc-alk Mo
Skouries	Kassandra mining district	Kerdylion Unit	Cu Au Pd Ru Te Mo	Sub-alk Cu-Au
Fisoka	Kassandra mining district	Kerdylion Unit	Cu Au Pb Zn	High-K calc-alk Cu-Au
Alatina	Kassandra mining district	Kerdylion Unit	Cu Au	High-K calc-alk Cu
Tsikara	Kassandra mining district	Kerdylion Unit	Cu Au Pb Zn	High-K calc-alk Cu-Au
Dilofon	Kassandra mining district	Kerdylion Unit	Cu Au Pb Zn	High-K calc-alk Cu
Vathi	Kilkis	Vertiskos Unit	Cu Au Ag Fe Mo U	Sub-alk Cu-Au
Gerakario	Kilkis	Vertiskos Unit	Cu Au	Sub-alk Cu-Au
Fakos Limnos		Rhodope massif	Cu Mo Au Ag Bi Te	Sub-alk Cu-Mo porphyry
Sardes Limnos		Rhodope massif	Cu Mo Au As Zn Pb	Sub-alk Cu-Mo
Stipsi Lesvos		Rhodope massif	Cu Mo Re Bi Pb Se Ag Au	Sub-alk Mo
Plaka Lavrion		Attic-Cycladic crystalline Belt	Cu Mo W	Sub-alk Cu-Mo porphyry

Πίνακ. 2. (συνέχεια)

Deposit name	Morphology of ore bodies	Main host rocks	Age:HR, ALT, MIN	Tonnage and grades	References
Maronia	Stockwork, disseminated, veins	microgranite porphyry	Oligocene		Melfos et al., 2002
Pagoni Rachi	Stockwork, disseminated, veins	granodiorite-tonalite porphyry	Oligocene		Voudouris et al., 2013b
Konos	Stockwork, disseminated	granodiorite porphyry	Oligocene (ALT: 33.1–31.2 Ma)		Voudouris et al., 2006; Orтели et al., 2010
Koryfes	Disseminated, vein, stockwork	microdiorite porphyry	Oligocene (ALT: 32.0 ± 0.5 Ma)		Voudouris et al., 2006; Orтели et al., 2010
Myli	Stockwork, disseminated, vein	granodiorite porphyry	Oligocene		Voudouris et al., 2013c
Melitena	Vein, stockwork, disseminated	granodiorite porphyry	Oligocene		Voudouris and Melfos, 2012; Voudouris et al., 2013c
Skouries	Breccia, disseminated, veins, stockwork	Monzonite porphyry	Miocene (HR:20.56 ± 0.48 to 19.59 ± 0.17 Ma; ALT:19.9 ± 0.9 Ma)	Reserves: 152,736 Mt at 0.8 g/t Au, and 0.5% Cu, for 3.8 Moz Au and 776 Mt Cu	Frei, 1995; Hahn et al., 2012; Siron et al., 2016; Eldorado Gold Corp., 2017
Fisoka	Breccia, disseminated, veins, stockwork	Diorite and granodiorite porphyries	Oligocene (HR:24.47 ± 0.14 Ma; ALT:24.5 ± 1.2 to 23.0 ± 1.2 Ma)		Gilg and Frei, 1994; Tompouloglou 1981; Siron et al., 2016
Alatina	Breccia, disseminated, veins, stockwork	Diorite and granodiorite porphyries	Oligocene		Gilg and Frei, 1994
Tsikara	Breccia, disseminated, veins, stockwork	Granodiorite and monzodiorite porphyries	Oligocene (HR: 27.00±0.19 to 26.65 ± 0.31 Ma; ALT:21.2 ± 1.03 Ma)		Tompouloglou, 1981; Gilg and Frei, 1994; Siron et al., 2016

Πίν. 2. (συνέχεια)

Deposit name	Morphology of ore bodies	Main host rocks	Age:HR, ALT, MIN	Tonnage and grades	References
Dilofon	Breccia, disseminated, veins, stockwork	Diorite and granodiorite porphyries	Oligocene-Miocene?		Gilg, 1993
Vathi	Stockwork, veinlets, veins, disseminated	Qtz-monzonite porphyry, trachydacite	Miocene (HR: 18 ± 0.5 to 17 ± 1 Ma)	Resources: 15 Mt at 0.8 g/t Au, and 0.3 % Cu	Veranis and Tsamantouridis, 1991; Stergiou et al., 2016
Gerakario	Vein, disseminated	Syenite and granodiorite porphyries	Miocene (HR: 34 ± 0.5 and 22 ± 0.8 Ma)	Probable reserves: 28 Mt at 0.9 g/t Au and 0.4% Cu	Frei, 1992; Tsirambides and Filippidis, 2012
Fakos Limnos	Stockwork, breccia, disseminated, vein	Quartz monzonite porphyry	Miocene (HR: 21.3 ± 0.7 to 20.2 ± 0.2 Ma)		Voudouris and Alfieris, 2005; Fornadel et al., 2012
Sardes Limnos	Veinlets, stockworks, disseminated	Quartz monzonite porphyry, sandstones, marls	Miocene (HR: 21.3 ± 0.7 to 20.2 ± 0.2 Ma)		Voudouris and Alfieris, 2005
Stipsi Lesvos	Veinlets, stockwork, disseminated	Dacite porphyry	Miocene (HR: 18.4 ± 0.5 Ma)		Voudouris and Alfieris, 2005
Plaka Lavrion	Sheeted quartz veins, stockwork	Granodiorite porphyry	Miocene (HR: 9.4 to 7.1 ± 0.6 Ma)		Altherr and Siebel, 2002; Voudouris et al 2008a

Παγώνη Ράχη

Το κοίτασμα Cu-Mo-Re-Au της Παγώνης Ράχης στην περιοχή Κίρκης συνδέεται με έναν γρανοδιοριτικό-τοναλιτικό πορφύρη και αποτελεί ένα τηλεσκοπικό πορφυριτικό και IS επιθερμικό σύστημα. Η μεταλλοφορία απαντάται σε τέσσερα παραγενετικά στάδια: α) νατριούχα / ποτασσική-ασβεστούχα εξαλλοίωση με πλούσιες σε χρυσό χαλαζιακές φλέβες μαγνητίτη-βορνίτη-χαλκοπυρίτη (τύπου A και M) και απομακρυσμένη προπυλιτική εξαλλοίωση (β) νατριούχα/ ποτασσική εξαλλοίωση με φλέβες σιδηροπυρίτη-χαλκοπυρίτη-

μολυβδαινίτη-χαλαζία (τύπου Β) (γ) σερικιτική εξαλλοίωση με «μεταβατικές» πορφυριτικές σε επιθερμικές φλέβες από σιδηροπυρίτη-χαλκοπυρίτη-μολυβδαινίτη (τύπου D) που περιλαμβάνουν αυτοφυή χρυσό και ορυκτά που φέρουν Ag, Bi, Te, Se και (δ) αργιλική εξαλλοίωση με επιθερμικές φλέβες χαλαζία-ασβεστίτη βασικών πολύτιμων μετάλλων (τύπος E) πλούσιες σε Au, Ag και Te, με πιθανή γενετική σχέση με φλέβες τύπου D (Voudouris et al., 2013b).

Η μεταλλοφορία έλαβε χώρα στους 360 ° -510 ° C, από βρασμό υδροθερμικών ρευστών που κυριαρχούνται από μια φάση ατμών. Χημικές αναλύσεις μεταλλεύματος περιέχουν έως 5,1 g/t Au, έως 1 wt% Cu, έως 40 ppm Te, έως 2000 ppm Mo και έως 20 ppm Re που αντικατοπτρίζει το εξαιρετικά υψηλό περιεχόμενο του Re σε μολυβδαινίτη (έως 5 wt%) (Voudouris et al., 2009).

Λόφος Κώνου

Στην περιοχή Σάπες-Κασσιτερές εμφανίζονται τρεις πορφυριτικές μεταλλοφορίες, συγκεκριμένα οι Κορυφές, ο λόφος Κώνου και η Παπαδοκορυφή. Η περιοχή αυτή αντιπροσωπεύει ένα ηφαιστειακό κέντρο του Ολιγοκαίνου, που επικαλύπτει δυσανάλογα το μεταμορφωμένο υπόβαθρο της Περιοδοπικής Ζώνης. Πέντε τύποι διεισδυτικών πετρωμάτων αναγνωρίστηκαν στην περιοχή, που είναι από τα παλαιότερα έως τα νεότερα: (α) γρανοδιοριτικός πορφύρης β) διοριτικός πορφύρης γ) μικροδιορίτης (δ) χαλαζιακός μονζοδιορίτης και (ε) μικρογρανιτικός πορφύρης.

Το κοίτασμα πορφυριτικού Cu-Mo-Re του Κώνου στις Σάπες φιλοξενείται από ένα γρανοδιοριτικό πορφύρη του Ολιγοκαίνου και αποτελείται από πορφυριτικά φλεβίδια χαλαζία stockworks. Όσον αφορά τις εξαλλοιώσεις, ο κύριος τύπος εξαλλοίωσης είναι η σερικιτική και η μεταλλοφορία αποτελείται κυρίως από σιδηροπυρίτη, μολυβδαινίτη, ρινίτη, χαλκοπυρίτη, εναργίτη και βορνίτη τόσο σε φλεβίδια χαλαζία stockwork όσο και διάσπαρτα στην μάζα του πετρώματος. Ένα εκτεταμένο προχωρημένης αργιλικής εξαλλοίωσης λιθοκάλυμμα υπερκαλύπτει το πορφυριτικό σύστημα και αποτελείται από πυροφυλλίτη, διάσπορο, ζουνίτη, αλουνίτη και ορυκτά APS στην κορυφή του λόφου Κώνου (Ortelli et al., 2009; Voudouris, 2014; Mavrogonatos et al., 2018a, b). Επιθερμικού τύπου φλέβες χαλαζία με σιδηροπυρίτη-τετραεδρίτη-τενναντίτη-εναργίτη διασχίζουν πρώιμες πορφυριτικές φλέβες (Voudouris et al., 2006; Ortelli et al., 2009).

Ο σχηματισμός της μεταλλοφορίας οφείλεται σε ένα ρευστό πρώιμου βρασμού στους περίπου 500 ° C, το οποίο στη συνέχεια εξελίχθηκε σε ένα ρευστό ~240 ° C.

Κορυφές

Το κοίτασμα Κορυφές πορφυριτικού Cu φιλοξενείται από πορφυριτικό μικροδιορίτη, χαλαζιακό μονζοδιορίτη και μικρογρανίτη. Η μεταλλοφορία πορφυριτικού Cu σχετίζεται γενετικά με την διείσδυση μικροδιορίτη και χαρακτηρίζεται από σιδηροπυρίτη και χαλκοπυρίτη κυρίως σε πορφυριτικού τύπου φλεβίδια χαλαζία-άστριου και ως διάσπαρτη σε νατριούχα/ποτασσική-ασβεστούχα εξαλλοίωση (Voudouris et al., 2006). Η νατριοασβεστούχα/ποτασσική εξαλλοίωση περιλαμβάνει χαλαζία, πλαγιόκλαστο, K-άστρο, φλογοπίτη, ακτινόλιθο, μαγνητίτη, σιδηροπυρίτη, και προοδευτικά μεταβάλλεται προς τα έξω σε μία προπυλιτική ζώνη εξαλλοίωσης (η προπυλιτική εξαλλοίωση περιβάλλει τις φλέβες). Το άνω μέρος του κοιτάσματος καταλαμβάνεται από ένα υψηλής θείωσης πυριτικό κάλυμμα που περιλαμβάνει χαλαζία ± διάσπορο ± τοπάζιο.

Οι αναλύσεις δειγμάτων επιφανειακών πετρωμάτων περιέχουν έως 700 ppm Cu και 0,5 g/t Au. Χημικές αναλύσεις μεταλλοφόρων πυριτωμένων πετρωμάτων που φέρουν διάσπορο στις Κορυφές περιέχουν Te (έως 1 ppm), Se (έως 6 ppm) και Mo (έως 22 ppm).

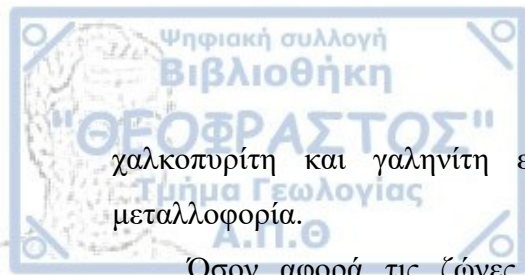
Μύλοι

Το κοίτασμα Cu-Mo-Au στην θέση Μύλοι της Αισύμης είναι ένα τηλεσκοπικό πορφυριτικό-επιθερμικό σύστημα που σχετίζεται γενετικά με ένα γρανοδιοριτικό πορφύρη και χαρακτηρίζεται από σερικιτική εξαλλοίωση. Η μεταλλοφορία εμφανίζεται διάσπαρτη κυρίως ως χαλκοπυρίτης, μολυβδαινίτης και αυτοφυής χρυσός και εντός φλεβών χαλαζία τύπου A και B και φλέβες σιδηροπυρίτη τύπου D (Voudouris et al., 2013c).

Υστερη επιθερμική επικάλυψη από πολυμεταλλικές φλέβες που φέρουν ανθρακικά, χαλαζία και βαρύτη, περιβάλλεται από σερικιτική και ανθρακική εξαλλοίωση του ξενιστή γρανοδιορίτη. Οι φλέβες περιέχουν σιδηροπυρίτη, σφαλερίτη, γαληνίτη και τενναντίτη. Χημικές αναλύσεις μεταλλεύματος πορφυριτικού τύπου στους Μύλους περιέχουν έως 0,4 g/t Au, έως 0,1 wt% Cu και έως 52 ppm Mo.

Μελίταινα

Το κοίτασμα πορφυριτικού Mo στην Μελίταινα φιλοξενείται από ένα πυριτωμένο και σερικιτικά εξαλλοιωμένο γρανοδιοριτικό πορφύρη που διείσδυσε σε μεταμορφωμένα πετρώματα της μάζας της Ροδόπης (Voudouris and Melfos, 2012; Voudouris et al., 2013c). Ο σιδηροπυρίτης και ο μολυβδαινίτης (έως και 1,74 wt % Re) και μικρότερες ποσότητες



χαλκοπυρίτη και γαληνίτη εμφανίζονται σε φλέβες χαλαζία και διάσπαρτα στην μεταλλοφορία.

Όσον αφορά τις ζώνες εξαλλοίωσης, η σερικιτική-προχωρημένη αργιλική ζώνη εξαλλοίωσης που περιβάλλει την μεταλλοφορία του μολυβδαινίτη περιέχει χαλαζία, σερικίτη, πυροφυλλίτη, διάσπορο και αργιλικά-φωσφορικά-θειικά (APS) ορυκτά. Μια επιθερμικού τύπου εξαλλοίωση υψηλής θείωσης και μεταλλοφορία εμφανίζεται κατά μήκος ρηγμάτων ΒΔ κλίσης και επικαλύπτεται πάνω στο πορφυριτικό σύστημα.

Οι χημικές αναλύσεις μεταλλεύματος των πορφυριτικά μεταλλοφόρων δειγμάτων έδωσαν έως 400 ppm Cu, 6000 ppm Mo και 0,3 ppm Au.

4.2 Μάζα Ροδόπης Μειοκαίνου

Φακός

Ο Φακός αποτελεί ένα πορφυριτικού τύπου κοίτασμα στην Λήμνο η οποία αποτελείται από αλκαλικά έως υποαλκαλικά πυριγενή πετρώματα του Κάτω Μειοκαίνου που διείσδυσαν μέσα σε ιζηματογενή πετρώματα του Μέσου Ηώκαινου έως Κάτω Μειοκαίνου. Το κοίτασμα του Φακού φιλοξενείται σε χαλαζιακό μονζονιτικό πορφύρη ηλικίας 20 Ma (Fornadel et al., 2012).

Η πορφυριτικού τύπου μεταλλοφορία αποτελείται από φλέβες χαλαζία τύπου Α- και Β πρώιμου σταδίου που σχετίζονται με ποτασσική και προπυλιτική εξαλλοίωση και περιέχουν σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, γαληνίτη, βορνίτη, σφαλερίτη, μολυβδαινίτη, μαγνητίτη και αιματίτη. Ένα επόμενο στάδιο μεταλλοφορίας που σχετίζεται με επιθερμικές φλέβες χαλαζία υψηλής έως ενδιάμεσης θείωσης επικάλυψαν την πορφυριτικού τύπου μεταλλοφορία. Οι φλέβες αυτές σχετίζονται με σερικιτική και αργιλική εξαλλοίωση. Οι προχωρημένες αργιλικές ζώνες εξαλλοίωσης που φέρουν αλουνίτη σχηματίζουν ένα στείρο λιθοκάλυμμα του πορφυριτικού συστήματος του Φακού.

Χημικές αναλύσεις επιφανειακών δειγμάτων από φλεβίδια stockworks χαλαζία έδωσαν έως 780 ppm Cu και έως 83 ppm Mo.

Σάρδες

Ένα άλλο πορφυριτικό σύστημα που φιλοξενείται στην Λήμνο, στο βορειοδυτικό τμήμα είναι οι Σάρδες. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει φλεβίδια stockwork που περιέχουν σιδηροπυρίτη και μολυβδαινίτη, που φιλοξενείται σε ένα μονζονιτικό πορφύρη του Μειοκαίνου και ιζηματογενή πετρώματα που εξαλλοιώνονται από χαλαζία-σερικίτη-

τουρμαλίνη (Voudouris and Alfieris, 2005). Οι φλέβες χαλαζία-σερικήτη-τουρμαλίνη με σιδηροπυρίτη και μολυβδαινίτη, και η εξαλλοίωση χαλαζία-αλουνίτη υψηλής θείωσης επικαλύπτουν την πρώιμη εξαλλοίωση και μεταλλοφορία. Πρόσφατα ανακαλύφθηκαν ποτασσικές και ποτασσικές-ασβεστούχες ζώνες εξαλλοίωσης του γρανοδιοριτικού πορφύρη.

Στύψη

Στη Λέσβο στην περιοχή της Στύψης βρίσκεται ένα κοίτασμα πορφυριτικού Cu-Mo το οποίο φιλοξενείται από έναν υψηλού K ασβεσταλκαλικό γρανοδιοριτικό πορφύρη και τα περιβάλλοντα ηφαιστειακά πετρώματα.

Η πορφυριτικού τύπου μεταλλοφορία χαρακτηρίζεται από έντονη προπυλτική, ανθρακική, σερικήτη, αργλική και στα ανώτερα επίπεδα, προχωρημένη αργλική και πυριτική εξαλλοίωση (Voudouris and Alfieris, 2005) και από ταινιοειδείς φλέβες χαλαζία που αναπτύχθηκαν κυρίως μέσα σε έναν μικρογρανίτη με ποτασσική εξαλλοίωση με έως 0,5 g/t Au, έως 2,6 ppm Ag και έως 70 ppb Pd (Voudouris et al. 2018a) και σχηματίστηκαν σε θερμοκρασίες από 420 ° έως >600 ° C.

Μέσα στις φλέβες, πρώιμος μαγνητίτης, χαλκοπυρίτης, βορνίτης και αυτοφυής χρυσός ακολουθήθηκαν από σιδηροπυρίτη, αιματίτη, σφαλερίτη και γαληνίτη. Ο μολυβδαινίτης εμφανίζεται σε όλη την παραγενετική ακολουθία. Οι φλέβες του σιδηροπυρίτη-μολυβδαινίτη-χαλκοπυρίτη (τύπου D) επικαλύπτουν πρώιμη μεταλλοφορία και εξαλλοίωση και ο μολυβδαινίτης σε αυτού του τύπου φλέβες είναι εξαιρετικά πλούσιος σε Au. Ένα στείρο λιθοκάλυμμα είναι εκτεθειμένο πάνω από την πορφυριτικού τύπου μεταλλοφορία.

Οι μέγιστες συγκεντρώσεις βασισμένες σε χημικές αναλύσεις από επιφανειακά δείγματα στο κοίτασμα της Στύψης ήταν 0,48 ppm Au, 1330 ppm Cu, 170 ppm Mo, και 1,7 ppm Ag.

4.3 Σερβομακεδονική Ζώνη Μειοκαίνου

Σκουριές

Σημαντικά πορφυριτικά κοιτάσματα συγκεντρώνονται εντός της Σερβομακεδονικής ζώνης. Συγκεκριμένα, στην περιοχή των Μεταλλείων Κασσάνδρας, στην ΒΑ Χαλκιδική υπάρχει το κοίτασμα πορφυριτικού Cu-Au στις Σκουριές. Η μεταλλοφορία σχετίζεται με έναν μονζονιτικό πορφύρη του Μειοκαίνου (Kroll et al., 2002; Siron et al., 2016) και εμφανίζεται διάσπαρτη καθώς και με τη μορφή φλεβών stockwork (Frei, 1995). Επιπλέον,

στην περιοχή εντοπίζονται και ορισμένα Ολιγοκαινικά πορφυριτικά κοιτάσματα στη Φυσώκα, στην Αλατίνα, στην Τσικάρα, και στο Δίλοφο,

Τα κύρια ορυκτά της μεταλλοφορίας στο κοιτάσμα των Σκουριών είναι ο σιδηροπυρίτης, χαλκοπυρίτης, βορνίτης, μαγνητίτης, με λίγο γαληνίτη και τετραεδρίτη, και ίχνη μολυβδαινίτη. Οι κόκκοι χρυσού εμφανίζονται συνήθως ως εγκλείσματα εντός του χαλκοπυρίτη. Εμφανίζονται επίσης σπάνια τελλουρίδια του Pd-Pt-Au-Ag (McFall et al., 2016). Ο μολυβδαινίτης εμφανίζεται σε ύστερα φλεβίδια σιδηροπυρίτη. Τουλάχιστον τρεις φάσεις μονζονιτικού πορφύρη αναγνωρίζονται, οι οποίες σχετίζονται με έντονη ποτασσική και προπυλιτική εξαλλοίωση. Τα αποδεδειγμένα και πιθανά αποθέματα ανέρχονται σε 152,7 Mt , με 0,8 g/t Au, και 0,5% Cu, για 3,8 Moz Au και 776 Mt Cu (Eldorado Gold Corp., 2017).

Βάθη

Στην Ενότητα Βερτίσκου της Σερβομακεδονικής ζώνης και συγκεκριμένα στην περιοχή Κιλκίς, το πιο σημαντικό πορφυριτικό κοιτάσμα βρίσκεται στη Βάθη. Η μεταλλοφορία σχετίζεται με την διείσδυση του χαλαζιακού μονζονιτικού πορφύρη στους γνεύσιους του υποβάθρου και φιλοξενείται σε έναν τραχειδακιτικό πορφύρη ο οποίος χαρακτηρίζεται από ασθενή ποτασσική και ισχυρή προπυλιτική εξαλλοίωση, επικαλυμμένη από σερικιτική εξαλλοίωση και πυριτίωση. Ο χαλαζιακός μονζονίτης επηρεάζεται από μια ισχυρή ποτασσική και μία επακόλουθη σερικιτική εξαλλοίωση (Frei, 1992; Stergiou et al., 2016). Η μεταλλοφορία σχηματίζει φλεβίδια stockworks, παράλληλες φλέβες, φλέβες τύπου D χαλαζία-σιδηροπυρίτη, και ένα μεταλλοφόρο φρεατομαγματικό breccia που διεισδύει στον τραχειδακιτικό πορφύρη με κλίση ABA-ΔΝΔ. Επιφανειακά οξειδωμένα δείγματα από τον γρανοδιοριτικό πορφύρη περιέχουν κατά μέσο όρο 2607 ppm Cu, 335 ppm Mo και 0,73 g/t Au και έως 330 ppm U, έως 500 ppm La, και έως 715 ppm Ce (Stergiou et al., 2016). Το κοιτάσμα αυτό εκτιμάται ότι περιέχει 15 Mt μεταλλεύματος με 0,30% Cu και 0,8 g/t Au (Veranis and Tsamantouridis, 1991; Stergiou et al., 2016).

Γερακαριό

Το πορφυριτικό-επιθερμικό σύστημα στο Γερακαριό βρίσκεται πολύ κοντά στη Βάθη. Η μεταλλοφορία χαλκού συνδέεται με ποτασσικά εξαλλοιωμένο συηνιτικό πορφύρη και έναν σερικιτικά και προπυλιτικά εξαλλοιωμένο γρανοδιοριτικό πορφύρη. Η μεταλλοφορία εμφανίζεται διάσπαρτη με σιδηροπυρίτη-χαλκοπυρίτη και φλέβες μαγνητίτη-σιδηροπυρίτη-χαλκοπυρίτη. Οι φλέβες χαλαζία που φέρουν αντιμονίτη στον γειτονικό γνεύσιο αποδίδονται

σε ένα επόμενο επιθερμικό στάδιο. Τα πιθανά αποθέματα είναι 28 Mt με 0,4% Cu και 0,9 g/t Au (Tsirambides and Filippidis, 2012).

4.4 Αττικοκυκλαδική Ζώνη Μειοκαίνου

Λαύριο

Η Πλάκα στην περιοχή εξόρυξης του Λαυρίου περιλαμβάνει μία μεταλλοφορία πορφυριτικού Mo-W σε φλέβες χαλαζία (πάχος έως 40 εκ.) και φλεβίδια stockworks που κόβουν έναν γρανοδιορίτη ηλικίας Άνω Μειοκαίνου. Η μεταλλοφορία αποτελείται από σιδηροπυρίτη, μολυβδαινίτη, χαλκοπυρίτη, μαγνητοπυρίτη και δευτερευόντως σεελίτη. Ο χαλαζίας, ο υδροθερμικός βιοτίτης, ο K-άστριος και ο σερικίτης είναι τα σύνδρομα ορυκτά. Ο γρανοδιορίτης εξαλλοιώθηκε έντονα σε ποτασσικές, νατριούχες, προπυλιτικές και σερικιτικές παραγενέσεις, τοπικά με πυριτίωση και διείσδυσε στο footwall ενός ρήγματος αποκόλλησης. Χημικές αναλύσεις επιφανειακών δειγμάτων μεταλλεύματος έδωσαν έως 1200 ppm Mo, 760 ppm W και 3 wt.% Fe.

5. ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ

Όσον αφορά την αναζήτηση κοιτασμάτων, υπάρχουν πολλά μεταλλικά στοιχεία που αναγνωρίζονται ως ιχνηλάτες στην πορφυριτική-επιθερμική μεταλλοφορία στην Ελλάδα (Voudouris et al., 2007b, 2018b). Συγκεκριμένα, τα ορυκτά που ενσωματώνουν Bi, Te και Se στη δομή τους όπως τα Bi-χαλκογονίδια, έχουν αναγνωριστεί ως οδηγοί στην εξερεύνηση για μεταλλεύματα που φέρουν χρυσό, καθώς συνδέονται στενά με τον χρυσό είτε με τη μορφή αυτοφυών στοιχείων είτε ως τελλουρίδια χρυσού-αργύρου. Ισχυρή απόδειξη για την εγγύτητα σε μια μαγματική πηγή αποτελεί η παρουσία Bi και Te με τη μορφή θειοαλάτων του βισμούθιου ή/και του τελλουρίου, και διαφόρων τύπων τελλουριδίων βασικών (και πολύτιμων) μετάλλων στην μεταλλοφορία. Επιπλέον, ο γαληνίτης πλούσιος σε Se ή/και Bi και τα χαλκογονίδια Bi με Se σε αρκετά πορφυριτικά-επιθερμικά κοιτάσματα στη Βόρεια Ελλάδα (π.χ. Σάπες-Κασσιτερές, Παγώνη-Ράχη, Πέραμα, Πεύκα, Σκουριές) είναι ενδεικτικά υψηλής θερμοκρασίας, μαγματικών-υδροθερμικών ρευστών κατά τα αρχικά στάδια της απόθεσης της μεταλλοφορίας και της εγγύτητας με πορφυριτικά συστήματα (Voudouris et al., 2018b). Ως φορέας για υψηλής συγκέντρωσης μεταλλεύματος θα μπορούσε πιθανώς να χρησιμοποιηθεί ο πλούσιος σε Re μολυβδαινίτης ο οποίος συνδέεται με τον αυτοφυή χρυσό και τον χαλκοπυρίτη στις σερικιτικές ζώνες εξαλλοίωσης των πορφυριτικών κοιτασμάτων Μύλοι και Παγώνη Ράχη. Ο άφθονος υδροθερμικός μαγνητίτης είναι ένας καλός δείκτης

πιθανών κοιτασμάτων πορφυριτικού Cu πλούσιων σε Au (Sillitoe, 1979) και η παρουσία ταινιωτών φλεβιδίων χαλαζία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτοποίηση των περισσότερων κοιτασμάτων πορφυριτικού Au φτωχών σε Cu (Vila and Sillitoe, 1991).

Στην Ελλάδα, τα διάφορα λιθοκαλύμματα στις Σάπες-Κασσιτερές, στην Μελίταινα-Καλότυχο, στην τεκτονική λεκάνη Πετρωτών, στον Φακό, στην Στύψη και στο VMS-επιθερμικό σύστημα στη Μήλο, χαρακτηρίζονται από ζώνες υπολειμματικού χαλαζία και προχωρημένη αργιλική εξαλλοίωση που επικαλύπτει πορφυριτικά συστήματα. Οι παραγενέσεις προχωρημένης αργιλικής εξαλλοίωσης χαρακτηρίζονται από την παρουσία πυροφυλλίτη, καολινιτίτη, κορούνδιου, διάσπορου, αλουνίτη, τοπάζιου, ζουνίτη, τουρμαλίνη και ορυκτά APS. Αυτές οι παραγενέσεις επικαλύπτουν και εκτίθενται πλευρικά από πορφυριτικού τύπου μεταλλοφορία η οποία συνδέεται επίσης με επιθερμικά κοιτάσματα Au-Ag-Te υψηλής θείωσης. Η κατανομή των βασικών ορυκτών (π.χ. κορούνδιο, τοπάζιο, πυροφυλλίτης, ζουνίτης, διάσπορο, αλουνίτης και ορυκτά APS) θα πρέπει να χαρτογραφούνται προσεκτικά, δεδομένου ότι είναι δείκτες παλαιοθερμοκρασίας (π.χ. Sillitoe, 2010) και είναι χαρακτηριστικά συγκεκριμένων μορφών μεταλλοφορίας. Σε μικρά βάθη, η πυριτίωση του οπάλιου που συνοδεύει τον σχηματισμό αλουνίτη μπορεί να είναι στόχος πλούσιας επιθερμικής μεταλλοφορίας Au-Ag σε υποαέριο έως υποθαλάσσιο περιβάλλον θερμής πηγής, όπως στην Μαυροκορυφή, στην τεκτονική λεκάνη των Πετρωτών, και στα Πεύκα. Γενικά, η αναζήτηση θα πρέπει να επικεντρωθεί πρώτα στις περιφέρειες των λιθοκαλυμμάτων. Αν η αναζήτηση γίνει για κοιτάσματα υψηλής θείωσης Au, τα ρηχά μέρη των λιθοκαλυμμάτων μπορεί να έχουν τις καλύτερες δυνατότητες για την ανακάλυψη μεγάλων, αν και συνήθως χαμηλής συγκέντρωσης μεταλλοφόρων σωμάτων. Επιπλέον, οι στόχοι αναζήτησης για πορφυριτικές μεταλλοφορίες Au δεν πρέπει να περιορίζονται μόνο στην ποτασσική, αλλά και στη νατριοασβεστούχα-ποτασσική εξαλλοίωση, η οποία συνήθως είναι στείρα και εμφανίζεται στην περιφέρεια από άλλα πορφυριτικά συστήματα (Halley et al., 2015).

Τα περισσότερα λιθοκαλύμματα φιλοξενούν HS επιθερμικά κοιτάσματα παρόλο που κάποια από αυτά είναι στείρα. Στην Ελλάδα, τα επιθερμικά κοιτάσματα HS που φιλοξενούνται σε ηφαιστειακά πετρώματα σχετίζονται χωρικά με ανδεσιτικά έως δακιτικά υποηφαιστειακά πετρώματα (π.χ. Μελίταινα-Καλότυχο, λόφος Περάματος, Μαυροκορυφή, Πεύκα, Σάπες, Φακός) καθώς και όξινα γρανιτοειδή όπως οι μικρογρανίτες στη Μαρώνεια και οι φλέβες μικρογρανιτών στο πολυμεταλλικό κοίτασμα Pb-Zn-Ag-Bi-Sn στον Άγιο Φίλιππο.

Επιπλέον, ένας εμπλουτισμός σε Bi, Ag, Sn, In, Ga και Ge στην πλειονότητα των επιθερμικών κοιτασμάτων (π.χ. λόφος Πέραμα, Σάπες, Άγιος Φίλιππος, Πεύκα) θεωρείται ότι σχετίζεται με μια συνεισφορά από όξινα (γρανιτικά) μάγματα (Voudouris et al., 2011a, 2013b). Ο πλούσιος σε πτητικά ρυολιθικός μαγματισμός παίζει σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό πολλών σημαντικών πορφυριτικών-επιθερμικών κοιτασμάτων (π.χ. Μαρώνεια, διάφορα κοιτάσματα στην περιοχή Σαπών, Άγιος Φίλιππος, Στύψη) και σχετικών επιθερμικών συστημάτων HS, και πρέπει να αποτελούν αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα στην Ελλάδα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bonev, N., Marchev, P., Moritz, R., Collings, D., 2015. Jurassic subduction zone tectonics of the Rhodope Massif in the Thrace region (NE Greece) as revealed by new U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Evros ophiolite and high-grade basement rocks. *Gondwana Res.* 27, 760–775.
- Bonev, N., Spikings, R., Moriz, R., Marchev, P., 2013. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints on the timing of Tertiary crustal extension and its temporal relation to ore-forming and magmatic processes in the Eastern Rhodope Massif, Bulgaria. *Lithos* 180–181, 264–278.
- Burg, J.-P., 2012. Rhodope: from Mesozoic convergence to Cenozoic extension. Review of petro-structural data in the geochronological frame. *J. Virtual Explorer* 42, 44, paper 1.
- Brun, J.-P., Faccenna, C., Gueydan, F., Sokoutis, D., Philippon, M., Kydonakis, K., Gorini, C., 2016. The two-stage Aegean extension, from localized to distributed, a result of slab rollback acceleration. *Can. J. Earth Sci.* 53, 1142–1157.
- Eldorado Gold Corp., 2017. Assets; Resources and Reserves. <http://www.eldoradogold.com> (accessed 20th May 2017).
- Ersoy, E.Y., Palmer, M.R., 2013. Eocene-Quaternary magmatic activity in the Aegean: implications for mantle metasomatism and magma genesis in an evolving orogeny. *Lithos* 180–181, 5–24.
- Grasemann, B., Schneider, D.A., Stöckli, D.F., Iglseder, C., 2012. Miocene bivergent crustal extension in the Aegean: evidence from the western Cyclades (Greece). *Lithosphere* 4, 23–39.

- Halley, S., Dilles, J.H., Tosdal, R.M., 2015. Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits. SEG Newsletter 100, 1 & 12–17.
- Halley, S. W., Dilles, J. H., & Tosdal, R. M. (2015). Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits: SEG Newsletter, no. 100.
- Jolivet, L., Brun, J.-P., 2010. Cenozoic geodynamic evolution of the Aegean region. *Int. J. Earth Sci.* 99, 109–138.
- Jolivet, L., Faccenna, C., Huet, B., Labrousse, L., Le Pourhiet, L., Lacombe, O., Lecomte, E., Burov, E., Denèle, Y., Brun, J.-P., Philippon, M., Paul, A., Salaün, G., Karabulut, H., Piromallo, C., Monié, P., Gueydan, F., Okay, A.I., Oberhänsli, R., Pourteau, A., Augier, R., Gadenne, L., Driussi, O., 2013. Aegean tectonics: strain localization, slab tearing and trench retreat. *Tectonophysics* 597, 1–33.
- Jolivet, L., Menant, A., Sternai, P., Rabillard, A., Arbaret, L., Augier, R., Laurent, V., Beaudoin, A., Grasemann, B., Huet, B., Labrousse, L., Le Pourhiet, L., 2015. The geological signature of a slab tear below the Aegean. *Tectonophysics* 659, 166–182.
- Kanellopoulos, C., Voudouris, P., Moritz, R., 2014. Detachment-related Sb-As-Au-Ag-Te mineralization in Kallintiri area, northeastern Greece: Mineralogical and geochemical constraints. *Proceedings 20th CBGA Congress, Tirana, Albania, Buletini i Shkencave Gjeologjike Special Issue 1*, 162–165.
- Kilias, S.P., Nomikou, P., Papanikolaou, D., Polymenakou, P.N., Godelitsas, A., Argyraki, A., Carey, S., Gamaletsos, P., Mertzimekis, T.J., Stathopoulou, E., Goettlicher, J., Steinhinger, R., Betzelou, K., Livanos, I., Christakis, C., Croff Bell, K., Scoullou, M., 2013b. New insights into hydrothermal vent processes in the unique shallow-submarine arc-volcano, Kolumbo (Santorini), Greece. *Nat. Sci. Rep.* 3. <https://doi.org/10.1038/srep02421>.
- Kilias, S.P., Paktsevanoglou, M., Giampouras, M., Stavropoulou, A., Apeiranthiti, D., Mitsis, I., Naden, J., Kemp, S.J., Shepherd, T.J., Koutles, T., Michael, C., Christidis, C., 2013a. Gold occurrence, mineral textures and ore fluid properties at the Viper (Sappes) epithermal Au-Ag-Cu orebody, Thrace, Greece: Society of Geology Applied to Mineral Deposits, SGA Biennial Meeting 12th, Uppsala, Sweden, 2013. *Proceedings* 2, 813–816.
- Kirchenbaur, M., Pleuger, J., Jahn-Awe, S., Nagel, T.J., Froitzheim, N., Fonseca, R.O.C., Münker, C., 2012. Timing of high-pressure metamorphic events in the Bulgarian Rhodopes from Lu–Hf garnet geochronology. *Contrib. Miner. Petrol.* 163, 897–921.

- Kouzmanov, K., Pokrovski, G.S., 2012. Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu (-Mo-Au) systems. *Soc. Econ. Geol. Spec. Publ.* 16, 573–618.
- Kounov, A., Wüthrich, E., Seward, D., Burg, J.P., Stockli, D., 2015. Low-temperature constraints on the Cenozoic thermal evolution of the Southern Rhodope Core Complex (Northern Greece). *Int. J. Earth Sci.* 104, 1337–1352.
- Kydonakis, K., Brun, J.-P., Sokoutis, D., 2015a. North Aegean core complexes, the gravity spreading of a thrust wedge. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, 595–616.
- Kydonakis, K., Brun, J.-P., Sokoutis, D., Gueydan, F., 2015b. Kinematics of Cretaceous subduction and exhumation in the western Rhodope (Chalkidiki block). *Tectonophysics* 665, 218–235.
- Lehmann, S., Barcikowski, J., von Quadt, A., Gallhofer, D., Peytcheva, I., Heinrich, C.A., Serafimovski, T., 2013. Geochronology, geochemistry and isotope tracing of the Oligocene magmatism of the Buchim-Damjan-Borov Dol ore district: implications for timing, duration and source of the magmatism. *Lithos* 180–181, 216–233.
- Marchev, P., Georgiev, S., Raicheva, R., Peytcheva, I., von Quadt, A., Ovtcharova, M., Bonev, N., 2013. Adakitic magmatism in post-collisional setting: an example from the early–middle Eocene Magmatic Belt in Southern Bulgaria and Northern Greece. *Lithos* 180–181, 159–180.
- Márton, I., Moritz, R., Spikings, R., 2010. Application of low-temperature thermochronology to hydrothermal ore deposits: formation, preservation and exhumation of epithermal gold systems from the Eastern Rhodope, Bulgaria. *Tectonophysics* 483, 240–254.
- Mavrogenatos, C., Voudouris, P., Spry, P.G., Melfos, V., Klemme, S., Berndt, J., Baker, T., Moritz, R., Bissig, T., Monecke, T., Zaccarini, F., 2018b. Mineralogical study of the advanced argillic alteration zone at the Konos Hill Mo–Cu–Re–Au porphyry prospect, NE Greece. *Minerals* 8, 479.
- Mavrogenatos, C., Voudouris, P., Spry, P.G., Melfos, V., Klemme, S., Berndt, J., Moritz, R., Kanellopoulos, C. 2018a. First zunyite-bearing lithocap in Greece: The case of Konos Hill Mo–Re–Cu–Au porphyry system. In: *Proc. 1st Int. Electr. Conf. Mineral Science*, pp. 12, doi: 10.3390/IECMS2018-05450.
- McFall, K.A., Naden, J., Roberts, S., Baker, T., Spratt, J., McDonald, I., 2018. Platinum group minerals in the Skouries Cu–Au (Pd, Pt, Te) porphyry deposit. *Ore Geol. Rev.* 99, 344–364.
- McFall, K.A., Roberts, S., Teagle, D., Naden, J., Lusty, P., Boyce, A., 2016. The origin and distribution of critical metals (Pd, Pt, Te & Se) within the Skouries Cu–Au porphyry

- deposit, Greece. Extended Abstracts of the Conference: Mineral Deposits Study Group meeting, 39th, Dublin, Ireland, 1 p.
- Meinhold, G., Kostopoulos, D.K., 2013. The Circum-Rhodope Belt, northern Greece: age, provenance, and tectonic setting. *Tectonophysics* 595–596, 55–68.
- Melfos, V., Voudouris, P., 2017. Cenozoic metallogeny of Greece and potential for precious, critical and rare metals exploration. *Ore Geol. Rev.* 59, 1030–1057.
- Menant, A., Jolivet, L., Tuduri, J., Loiselet, C., Bertrand, G., Guillou-Frottier, L., 2018. 3D subduction dynamics: a first-order parameter of the transition from copper- to gold-rich deposits in the eastern Mediterranean region. *Ore Geol. Rev.* 94, 118–135.
- Menant, A., Jolivet, L., Vrielynck, B., 2016. Kinematic reconstruction and magmatic evolution illuminating crystal and mantle dynamics of the eastern Mediterranean region since the late Cretaceous. *Tectonophysics* 675, 103–140.
- Moritz, R., Márton, I., Ortelli, M., Marchev, P., Voudouris, P., Bonev, N., Spikings, R., Cosca, M., 2010. A review of age constraints of epithermal precious and base metal deposits of the Tertiary Eastern Rhodopes: coincidence with Late Eocene–Early Oligocene tectonic plate reorganization along the Tethys. In: Christofides, G., et al. (Eds.), *Proceedings of the XIX Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association, Thessaloniki. Scientific Annals of the School of Geology A.U.Th.* 100, 351–358.
- Ortelli, M., Moritz, R., Voudouris, P., Spangenberg, J., 2009. Tertiary porphyry and epithermal association of the Sapes-Kassiteres district, Eastern Rhodopes, Greece. In: Williams, P., et al., (Eds.), *Smart science for exploration and mining. Proceedings 10th SGA meeting, Townsville, Australia*, pp. 536–538.
- Papavassiliou, K., Voudouris, P., Kanellopoulos, C., Glasby, G., Alfieris, D., Mitsis, I., 2017. New geochemical and mineralogical constraints on the genesis of the Vani hydrothermal manganese deposit at NW Milos island, Greece: comparison with the Aspro Gialoudi deposit and implications for the formation of the Milos manganese mineralization. *Ore Geol. Rev.* 80, 594–611.
- Pe-Piper, G., Piper, D.J.W., Koukouvelas, I., Dolansky, L.M., Kokkalas, S., 2009. Postorogenic shoshonitic rocks and their origin by melting underplated basalts: the Miocene of Limnos Island, Greece. *Geol. Soc. Am. Bull.* 121, 39–54.
- Periferakis, A., Voudouris, P., Melfos, V., Kolodziejczyk, J., Mavrogonatos, C., Alfieris, D., 2018. New mineralogical and geochemical constraints on the Stypsi-Megala Therma

- porphyry-epithermal mineralization, Lesvos Island, Greece. In: 8th Geoch. Symp. Antalya, Turkey 2-6 May 2018, p.189 (Abstr.).
- Periferakis, A., Voudouris, P., Melfos, V., Mavrogonatos, C., Alfieris, D., 2017. The StypsiMegala Therma porphyry-epithermal mineralization, Lesvos Island, Greece: new mineralogical and geochemical data. Geophys. Res. Abstr. 19 EGU2017-12950.
- Repstock, A., Voudouris, P., Zeug, M., Melfos, V., Zhai, M., Li, H., Kartal, T., Matuszczak, J., 2016. Chemical composition and varieties of fahlore-group minerals from Oligocene mineralization in the Rhodope area, southern Bulgaria and northern Greece. Mineral. Petrol. 110, 103–123.
- Repstock, A., Voudouris, P., Kolitsch, U., 2015. New occurrences of watanabeite, colusite, “arsenosulvanite” and Cu-excess tetrahedrite-tennantite at the Pefka high-sulfidation epithermal deposit, northeastern Greece. N. Jahrb. Mineral. 192, 135–149.
- Richards, J.P., 2009. Post-subduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: products of remelting of subduction-modified lithosphere. Geology 37, 247–250.
- Richards, J.P., 2011. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins. Ore Geol. Rev. 40, 1–26.
- Ring, U., Glodny, J., Will, T., Thomson, S., 2010. The Hellenic subduction system: highpressure metamorphism, exhumation, normal faulting, and large-scale extension. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 38, 45–76.
- Robertson, A.H., Trivic', B., Deric', N., Bucurc, I.I., 2013. Tectonic development of the Vardar ocean and its margins: evidence from the Republic of Macedonia and Greek Macedonia. Tectonophysics 595–596, 25–54.
- Scheffer, C., Vanderhaeghe, O., Lanari, P., Tarantola, A., Ponthus, L., Photiades, A., France, L., 2016. Syn- to post-orogenic exhumation of metamorphic nappes: structure and thermobarometry of the western Attic-Cycladic metamorphic complex (Lavriion, Greece). J. Geodyn. 96, 174–193.
- Schefer, S., Cvetkovic, Fügenschuh, B., Kounov, A., Ovtcharova, M., Schaltegger, U., Schmid, S.M., 2011. Cenozoic granitoids in the Dinarides of southern Serbia: age of intrusion, isotope geochemistry, exhumation history and significance for the geodynamic evolution of the Balkan Peninsula. Int. J. Earth Sci. 100, 1181–1206.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. Econ. Geol. 105, 3–41.
- Siron, C.R., Rhys, D., Thompson, J.F.H., Baker, T., Veligrakis, T., Camacho, A., Dalampiras, L., 2018. Structural controls on porphyry Au-Cu and Au-rich polymetallic carbonate-

- hosted replacement deposits of the Kassandra mining district, northern Greece. *Econ. Geol.* 113, 309–345.
- Siron, C.R., Thompson, J.F.H., Baker, T., Friedman, R., Tsitsanis, P., Russell, S.V., Randall, S.B., Mortensen, J.K., 2016. Magmatic and metallogenic framework of Au-Cu porphyry and polymetallic carbonate-hosted replacement deposits of the Kassandra mining district, Northern Greece. *Soc. Econ. Geol. Spec. Publ.* 19, 29– 55.
- Tsirambides, A., Filippidis, A., 2012. Metallic mineral resources of Greece. *Central European. J. Geosci.* 4, 641–650.
- Turpaud, P., Reischmann, T., 2010. Characterisation of igneous terranes by zircon dating: implications for UHP occurrences and suture identification in the Central Rhodope, northern Greece. *Int. J. Earth Sci.* 99, 567–591.
- Varnavas, S. P., & Papavasiliou, C. (2020). Submarine hydrothermal mineralization processes and insular mineralization in the Hellenic Volcanic Arc system: A Review. *Ore Geology Reviews*, 103541.
- Voudouris, P., 2014. Hydrothermal corundum, topaz, diaspore and alunite supergroup minerals in the advanced argillic alteration lithocap of the Kassiteres-Sapes porphyryepithermal system, western Thrace, Greece. *N. Jahrb. Miner. Abhd.* 191, 117–136.
- Voudouris, P., 2011. Conditions of formation of the Mavrokoryfi high-sulfidation epithermal Cu-Ag-Au-Te deposit (Petrota Graben, NE Greece). *Mineral. Petrol.* 101, 97–113.
- Voudouris, P.C., Melfos, V., Baker, T., Spry, P.G., 2016c. Diverse styles of OligoceneMiocene magmatic-hydrothermal deposits in northeastern Greece: Relationships between tectonic-, magmatic activity, alteration and Au-Ag mineralization. *Soc. Econ. Geol. Guid. Ser.* 54, 83–112.
- Voudouris, P., Mavrogonatos, C., Spry, P. G., Baker, T., Melfos, V., Klemd, R., ... & Tarantola, A. (2019). Porphyry and epithermal deposits in Greece: An overview, new discoveries, and mineralogical constraints on their genesis. *Ore Geology Reviews*, 107, 654-691.
- Voudouris, P., Melfos, V., 2013. Aluminum-phosphate-sulfate (APS) minerals in the sericitic advanced argillic alteration zone of the Melitena porphyry-epithermal MoCu ± Au ± Re prospect, western Thrace, Greece. *N. Jahrb. Miner. Abhd.* 190, 11–27.
- Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P.G., Alfieris, D., Mavrogonatos, C., Repstock, A., Djiba, A., Stergiou, Ch., Periferakis, A., Melfou, M., 2018a. Porphyry and epithermal deposits

- in Greece: a review and new discoveries. In: 8th Geoch. Symp. Antalya, Turkey 2–6 May 2018, p.181 (Abstr.).
- Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P.G., Baker, T., 2016b. Cenozoic porphyry-epithermal and other intrusion-related deposits in northeastern Greece: geological, mineralogical and geochemical constraints. Soc. Econ. Geol. Guid. Ser. 54, 43–82.
- Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P.G., Bindi, L., Kartal, T., Arikas, K., Moritz, R., Ortelli, M., 2009. Rhenium-rich molybdenite and rheniite (ReS₂) in the Pagoni Rachi-Kirki Mo-Cu-Te-Ag-Au deposit, northern Greece: Implications for the rhenium geochemistry of porphyry style Cu-Mo and Mo mineralization. Can. Mineral. 47, 1013–1036.
- Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P.G., Bindi, L., Moritz, R., Ortelli, M., Kartal, T., 2013a. Extremely Re-rich molybdenite from porphyry Cu-Mo-Au prospects in northeastern Greece: mode of occurrence, causes of enrichment, and implications for gold exploration. Minerals 3, 165–191.
- Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P.G., Bindi, L., Moritz, R., Ortelli, M., Kartal, T., 2013c. Extremely Re-rich molybdenite from porphyry Cu-Mo-Au prospects in northeastern Greece: mode of occurrence, causes of enrichment, and implications for gold exploration. Minerals 3, 165–191.
- Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P.G., Kartal, T., Schleicher, H., Moritz, R., Ortelli, M., 2013b. The Pagoni Rachi/Kirki Cu-Mo-Re-Au-Ag-Te deposit, northern Greece: mineralogical and fluid inclusion constraints on the evolution of a telescoped porphyryepithermal system. Can. Mineral. 51, 411–442.
- Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P.G., Moritz, R., Papavasiliou, C., Falalakis, G., 2011a. Mineralogy and geochemical environment of formation of the Perama Hill highsulfidation epithermal Au-Ag-Te-Se deposit, Petrola graben, NE Greece. Mineral. Petrol. 103, 79–100.
- Voudouris, P., Siron, C.R., Márton, I., Melfos, V., Baker, T., Spry, P.G., 2016a. Eocene to Miocene hydrothermal deposits of northern Greece and Bulgaria: Relationships between tectonic-magmatic activity, alteration, and gold mineralization – a preface. Soc. Econ. Geol. Guid. Ser. 54, 1–15.
- Voudouris, P., Spry, P.G., Melfos, V., Haase, K., Klemd, R., Mavrogonatos, C., Repstock A., Alfieris, D., 2018b. Gold deposits in Greece: Hypogene ore mineralogy as a guide for precious and critical metal exploration. In: Proc. 1st Int. Electr. Conf. Mineral Science, pp. 13, doi: 10.3390/IECMS2018-05452.

